



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

OPTIMALIZACE DATOVÉ KOMUNIKACE PO SILNOPROUDÝCH VEDENÍCH

OPTIMIZATION OF DATA COMMUNICATION OVER HIGH-VOLTAGE LINES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETER MINÁRIK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR MLÝNEK

BRNO 2010



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Peter Minárik

ID: 77932

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Optimalizace datové komunikace po silnoprůdých vedeních

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vytvořte model telekomunikační soustavy s PLC kanálem. Dále vytvořte aplikaci pro nastavení různých typů modulací a kódování v souvislosti s odstupem signálu od šumu a bitovou chybovostí. Vyhodnoťte jednotlivé modulace a kódování.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Hrasnica, H. Broadband Powerline Communications Networks. John Wiley & Sons, Chichester 2004. ISBN 0-470-85741-2
- [2] Chee-Mun Ong. Dynamic simulation of electric machinery using Matlab/Simulink. Prentice Hall PTR, 1998. ISBN 0-13-723785-5
- [3] Blažek, V., Skala, P.: Distribuce elektrické energie. Skriptum VUT v Brně, FEKT.

Termín zadání: 29.1.2010

Termín odevzdání: 26.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Petr Mlýnek

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá rozborom PLC (Power Line Communication) systémom pre dátovú komunikáciu po silnoprúdových vedeniach. V úvode práce je popísaná technológia prenosu dát cez energetickú sieť a je zostavené rozčlenenie do odpovedajúcich kategórií s vysvetlením jednotlivých špecifikácií a charakteristík. Popísané sú tiež rušenia ovplyvňujúce prenášaný signál, rôzne typy kódovania a modulačné techniky používané v systéme PLC. V praktickej časti práce je zostavený model telekomunikačnej sústavy s prenosovým kanálom, realizovaným ako aditívny biely šum. V modeli je možné nastavenie rôznych typov modulácií a kódovaní v súvislosti s odstupom signálu od šumu a bitovou chybovosťou. Nastavenie jednotlivých blokov je v práci podrobne popísané. Zostavený model bol podrobený simulácii, ktorej výsledky sú zobrazené a vyhodnotené v závere práce.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

PLC, Matlab Simulink, OFDM, prenos dát, modulácia, kódovanie

ABSTRACT

The thesis deals with analysis of the PLC (Power Line Communication) system for data communications through powerlines. In the introduction describes the technology of data transmission through the energy network and is divided into categories corresponding with the explanation of the various specifications and features. Different types of coding, affecting the transmitted signal interference and modulation techniques used in a PLC are also described. The practical part is made up of telecommunications network model with transmission channel realized as additive white noise. The model can setup different types of modulation and coding in relate with the signal to noise ratio and bit error rates. The individual blocks settings are described in detail. The model was simulated. The results of simulation are displayed and evaluated at the end of work.

KEYWORDS

PLC, Matlab Simulink, OFDM, data transmission, modulation, coding

Bibliografická citace:

MINÁRIK, P. Optimalizace datové komunikace po silnoprůdých vedeních. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 50 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Mlýnek

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Optimalizace datové komunikace po silnoproudých vedeních“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne 26. 5. 2010

.....
(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Mlýnkovi, za jeho užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne 26. 5. 2010

.....
(podpis autora)

Obsah

Úvod.....	10
1 Silnoprúdové vedenia	11
1.1 Základné pojmy a rozdelenie.....	11
1.2 Elektrické parametre prvkov elektrických sietí.....	12
1.3 Parametre vedenia	13
1.3.1 Rezistancia vodičov vedenia.....	13
1.3.2 Indukčnosť vodičov vedenia	14
1.3.3 Kapacita vedenia.....	15
1.3.4 Konduktancia vedenia.....	15
1.3.5 Ostatné parametre vedenia.....	16
2 Základná konfigurácia systému PLC.....	17
2.1 Základné rozdelenie systému PLC.....	17
2.1.1 Úzkopásmové PLC.....	17
2.1.2 Širokopásmové PLC.....	19
2.2 Prístupová sieť.....	19
2.2.1 Sieťové prvky	21
3 Poskytované služby	22
3.1.1 Telefónia.....	22
3.1.2 Širokopásmový internetový prístup	23
3.1.3 In-home služby.....	23
3.1.4 Pokročilé širokopásmové služby	24
3.1.5 Aplikácie pre energetiku	24
4 Rušenie v silnoprúdovom vedení	25
5 Kódové zabezpečenie.....	26
5.1 Blokové kódy	26
5.1.1 Hammingové kódy.....	27
5.1.2 Reed-Solomonove kódy.....	27
5.2 Konvolučné kódy.....	27
5.3 Prekladanie.....	28
6 Modulácie používané v PLC systémoch	29
6.1 Ortogonálny frekvenčne delený multiplex OFDM	30

7	Simulácia v programe Matlab Simulink	32
7.1	Zostavenie prenosového modelu PLC.....	32
7.1.1	Zdroj dát.....	32
7.1.2	Kóder kanálu	33
7.1.3	Modulácia.....	34
7.1.4	Vkladanie pilotných signálov	34
7.1.5	IFFT a ochranný interval.....	35
7.1.6	Prenosový kanál.....	36
7.1.7	Prijímač.....	37
7.2	Popis použitia simulačného modelu.....	38
7.3	Výsledky simulácie.....	40
7.4	Záverečné zhodnotenie	46
8	Záver.....	47
9	Použitá literatúra.....	48
	Zoznam skratiek.....	49
	Príloha	50

Zoznam obrázkov

Obr. 1.: Model prenosovej linky	12
Obr. 2.: Štruktúra PLC siete	20
Obr. 3.: Stavové diagramy digitálnych modulácií	29
Obr. 4.: Prekrývanie výkonových spektier pre prípad 4 subnosných vln	30
Obr. 5.: Bloková schéma technológie OFDM	31
Obr. 6.: Blok kanálového kódovania s RS kodérom	33
Obr. 7.: Ukážka realizácie modulácie 64QAM.....	34
Obr. 8.: Vkladanie pilotných signálov.....	35
Obr. 9.: Transformácia IFFT a pridanie cyklického prefixu.....	36
Obr. 10.: Prenosový kanál	36
Obr. 11.: Zobrazenie sily signálu	37
Obr. 12.: Nastavenie vstupných parametrov	38
Obr. 13.: Zobrazovanie výstupov simulácie	39
Obr. 14.: Spektrum prenášaného signálu	41
Obr. 15.: Konštelčné diagramy modulovaného signálu 64QAM pre rôzne SNR	42
Obr. 16.: Závislosť BER na pomere E_b/N_0 pre rôzne digitálne modulácie	43
Obr. 17.: Závislosť BER na E_b/N_0 pre rôzne typy kódovania	44

Zoznam tabuliek

Tab. 1.: Pásmo v PLC	17
Tab. 2.: Prenosové rýchlosti pre zadané vstupné hodnoty	40

Úvod

Myšlienka použitia energetického vedenia pre dátovú komunikáciu prináša výhody ako sú jej dostupnosť takmer kdekoľvek, kde je privedené silové vedenie, jej ekonomická výhodnosť, kedy nie je potrebné vynakladať takmer žiadne finančné prostriedky do výstavby novej dátovej infraštruktúry a tiež istý druh mobility užívateľov, keďže zásuvka silového vedenia je v každej budove. Táto elektrická infraštruktúra je geograficky zrelá osloviť takmer všetky obývané oblasti. Práve toto ju robí veľmi atraktívnou ako prenosové médium pre ostatné služby ako dátová komunikácia. Značným problémom však je prenosové médium, ktoré bolo pôvodne vyvinuté pre prepravu a distribúciu elektrickej energie pre spotrebiteľov tým najefektívnejším spôsobom. Pri pokuse na opätovné použitie už existujúceho systému na iné účely sa nevyhneme problémom a postihnutiam napr. vo forme rušenia.

Súčasný výskum je zameraný hlavne na zvyšovanie prenosových rýchlostí pre podporu vysoko – rýchlostných sieťových aplikácií. Neustále dochádza k vývoju a vylepšovaniu prenosových technológií. Súčasne k tomu sú vyhľadávané iné možnosti a technológie, ktoré zaistujú súhrn s inými systémami alebo ich úplne nahradia.

Teoretická časť práce je úvodom do problematiky dátovej komunikácie po silnoprúdovom vedení. Popisuje systém PLC (Power Line Communication) a silové vedenia. Zameraná je na základnú konfiguráciu, popísané sú elektrické parametre vedení, ďalej je popísaný základný prenosový model s rozborom jeho jednotlivých častí. Systémy PLC môžu byť rozdelené na úzkopásmové, umožňujúce komunikáciu s relatívne nízkou prenosovou rýchlosťou (do 100 kbps) a širokopásmové PLC systémy umožňujúce prenosi rýchlosťami nad 2 Mbps.

Druhá časť práce je zameraná na popis nastavení konkrétnych blokov použitých na zostavenie prenosového modelu PLC komunikácie v prostredí Matlab/Simulink. Pre lepšiu orientáciu je vytvorený popis použitia simulačného modelu. Následne budú zobrazené a vyhodnotené výsledky simulácie. Na konci práce je záverečné zhrnutie dosiahnutých výsledkov a sú naznačené iné možnosti riešenia problematiky modelovania komunikačného kanála.

1 Silnoprúdové vedenia

1.1 Základné pojmy a rozdelenie

Distribúcia elektrickej energie ku koncovému užívateľovi je zaistovaná distribučnými sústavami, ktoré sú patria regionálnym rozvodným elektroenergetickým spoločnostiam. Systémy dodávky elektrickej energie sa skladá z troch úrovní siete, ktoré môžu byť použité ako prenosové médium pre realizáciu siete PLC:

- a) Zvlášť vysoké napätie (zvn) (400 kV)
- b) Veľmi vysoké napätie (vvn) (110 kV, 220 kV) siete spájajú elektrárne s rozsiahlymi prírodnými oblasťami alebo veľkoodberateľov. Väčšinou premostujú veľké vzdialenosti, čo umožňuje napájanie v rámci kontinentu. Realizované ako nadzemné vedenia.
- c) Vysoké napätie (vn) (6 kV, 10 kV, 22 kV, 35 kV) siete napájajú väčšie oblasti, mestá, priemyslových odoberateľov. Sú realizované buď ako nadzemné alebo podzemné vedenia.
- d) Nízke napätie (nn) (230/400 V) siete napájajú koncových užívateľov buď ako samostatných zákazníkov alebo ako jednotlivých užívateľov väčších zákazníkov. V mestských oblastiach sú realizované z podzemných káblov, zatiaľ čo vo vidieckych oblastiach existujú bežne ako nadzemné vedenie.

Elektrickou sieťou sa myslí súbor jednotlivých elektrických staníc a elektrických vedení vzájomne prepojených pre rozvod a prenos elektrickej energie. Delíme ich podľa účelu na:

Prenosové siete : prenos veľkých výkonov na veľké vzdialenosti. (220kV a 400kV)

Distribučné (rozvodné) siete : tvoria ich zariadenia pre rozvod elektrickej energie zo zdrojov zapojených do tejto siete až ku koncovým užívateľom alebo z prenosovej sústavy. (110kV a menej)

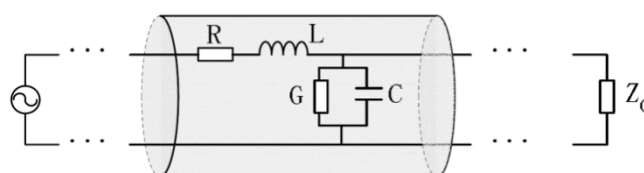
Priemyslové siete : slúžia na rozvod elektrickej energie v priemyslovom objekte alebo k prevádzke od hlavnej stanice objektu k jednotlivým spotrebičom. (odpovedá napätiu spotrebičov napr. 6kV,10kV).

Elektrárne dodávajú elektrickú energiu cez blokové transformátory do prenosovej sústavy, a ktorej sú ďalej napájané rozvodné sústavy. Tieto dve sústavy sa líšia napäťovými úrovňami a taktiež spôsobom spojenia elektrického streda (uzla) so zemou. V zásuvkách 230/400V prevažujú siete s uzlami vinutí transformátoru pripojenými na zem. Rozvodné sústavy 22kV a 35kV majú uzol izolovaný od zemi alebo pripojený cez zhášaciu tlmivku (resp. rezistor). Rozvodná sústava 110kV má uzemnený uzol, rovnako ako prenosová sústava 400kV a 220kV.

Elektrické vedenie je základným prvkom prenosových a distribučných sietí. Tvorí ho súbor vodičov, izolačných materiálov a konštrukcií určených pre transport elektrickej energie medzi dvoma bodmi elektrickej siete (uzly). Uzlom sa rozumie miesto pripojenia zdroja, spotrebiča alebo miesto rozvetvenia vedenia [3].

1.2 Elektrické parametre prvkov elektrických sietí

Základné prvky elektrických sietí sú vedenia, transformátory, kompenzačné kondenzátory, spúšťacie tlmivky atď. Pre potreby výpočtu elektrických sietí je nutné tieto zariadenia nahradiť pomocou vhodných náhradných modelov. V tejto kapitole budú uvedené používané náhradné modely základných prvkov a metódy určenia parametrov týchto modelov. V prvkoch elektrizačnej sústavy sa vyjadruje vzťah medzi napätím a prúdom pomocou štyroch základných parametrov: rezistanciu R a indukčnosť L v pozdĺžnom smere; konduktanciu G a kapacitu C v priečnom smere.



Obr. 1.: Model prenosovej linky

Nižšie budú používané odvodené parametre pri riešení ustálených stavov v sústavách $\sim 50\text{Hz}$: indukčná reaktancia $X = 2\pi \cdot f \cdot L$, kapacitná susceptancia $B = 2\pi \cdot f \cdot C$, pozdĺžna impedancia $Z = R + j \cdot X$ a priečna admitancia $Y = G + j \cdot B$ u vedení. resp. $Y = G - j \cdot B_t$ u transformátoru [3].

Elektrické vedenie sa rozdeľuje podľa spôsobu prevedenia na dva základné druhy a to *vzdušné* a *káblové* vedenie. Každý spôsob prevedenia má svoje vlastné špecifiká, určené jednotlivými parametrami vedenia, ktoré budú ďalej popísané so zameraním na vzdušné vedenia.

1.3 Parametre vedenia

Parametre vedení sú závislé na konštrukcii vodičov, na materiály, izolácii a usporiadanie vodičov. Parametre vedenia sa vyjadrujú v jednotkách na 1km dĺžky.

Pozdĺžna impedancia vedenia: $z_k = R_k + jX_k$ $[\Omega/km]$ (1.1.)

Priečna admitancia vedenia: $y_k = G_k + jB_k$ $[S/km]$ (1.2.)

R_k – rezistancia vedenia na jednotku dĺžky

X_k – indukčná reaktancia vedenia na jednotku dĺžky

G_k – konduktancia vedenia na jednotku dĺžky

B_k – kapacitná susceptancia vedenia na jednotku dĺžky

1.3.1 Rezistencia vodičov vedenia

Rezistencia vodiča sa pri elektromagnetických výpočtoch určuje pomocou rezistivity, dĺžky vedenia a menovitého prierezu. Okrem zmieňovaných majú na rezistanciu tiež vplyv teplota, odchýlky od menovitého prierezu, spoje vodičov, krútenie káblov, previs zavesených vodičov a v prípade striedavých prúdov *skinefekt*¹.

Pri ustálenej hodnote jednosmerného prúdu a ustálenej teplote vodiča platí vzorec pre rezistanciu:

$$R_0 = \rho_0 \frac{l}{S} \quad (1.3.)$$

ρ_0 rezistivita pri teplote $\vartheta_0 = 20^\circ\text{C}$ (med' = $17,9 \Omega\text{mm}^2/\text{km}$)

l dĺžka vodiča

S plocha prierezu vodiča

Zvyšovanie rezistancie s teplotou je pre elektroenergetické výpočty dôležité. Vplyv rozdielnej teploty na rezistanciu v porovnaní s teplotou ϑ_0 vypočítame pomocou:

$$k_\vartheta = \frac{R_\vartheta}{R_{\vartheta_0}} = 1 + \alpha_R \cdot (\vartheta - \vartheta_0) + \beta_R \cdot (\vartheta - \vartheta_0)^2 \quad [-] \quad (1.4.)$$

$R_\vartheta, R_{\vartheta_0}$ rezistancie pri teplote ϑ a ϑ_0

α_R teplotný súčiniteľ odporu (med' = $4,17 \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$)

β_R teplotný súčiniteľ odporu (med' = $0,45 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}^2$)

Keďže teplotný súčiniteľ β_R je oveľa menší než α_R môžeme v ustálenom stave uvažovať lineárnu závislosť rezistivity na teplote [3].

¹ Skinefekt – vzniká pri prechode striedavého prúdu, dôsledkom toho sa zväčšuje prúdová hustota smerom k povrchu vodiča. Táto nerovnomernosť rozloženia prúdu spôsobuje zväčšenie rezistancie v porovnaní s prechodom jednosmerného prúdu. Zvýšenie rezistancie skinefektom napr. u medených vodičov od prierezu 240mm^2 dosahuje hodnoty väčšie ako 1%.

1.3.2 Indukčnosť vodičov vedenia

Indukčnosť vyjadruje vplyv magnetického poľa pretekajúceho prúdu vo vodičoch na vodič. V prípade viacvodičových vedení vznikajú medzi jednotlivými vodičmi magneticky viazané obvody. Výsledná indukcia napätia v jednom vodiči je spôsobená časovo premenným magnetickým poľom vlastného vodiča ale aj pôsobením z ostatných vodičov.

V trojfázovom symetrickom vedení so súmernou záťažou sa indukčný vplyv vyjadruje pomocou prevádzkovej indukčnosti a prúdom v jednej fáze. Avšak v prípade nesúmernej záťaže (resp. nesúmerného vedenia) sa musia indukčné vplyvy vyjadrovať oddelene pomocou vlastnej a vzájomnej indukčnosti a prúdov v ostatných obvodoch. Indukčnosť vedenia je daná vzťahom

$$L = \frac{\mu_0 * \mu_{rv} * l_1}{2 * \pi} \ln \frac{d}{r} + \frac{\mu_0 * \mu_r * l_1}{8 * \pi} \quad [\text{H}] \quad (1.5)$$

kde

μ_0 ... permeabilita vákua
 μ_{rv} ... relatívna permeabilita
 l_1 ... dĺžka vodiča
 d ... osová vzdialenosť vodičov
 r ... polomer vodiča
 μ_r ... permeabilita

Obvykle sa indukčnosť vedení zadáva v jednotkách mH/km , dosadíme do predchádzajúceho vzťahu $l_1 = 1000 \text{ m}$, vyčíslime permeabilitu vákua $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ a relatívnu permeabilitu pre vonkajší magnetický obvod $\mu_{rv} = 1$, dostaneme indukčnosť vedenia:

$$L = 0,46 \cdot \log \frac{d}{r} + 0,05 \mu_r \quad [\text{mH/km}] \quad (1.6.)$$

kde

d ... osová vzdialenosť vodičov
 r ... polomer vodiča
 μ_r ... permeabilita

Druhý člen predstavuje zložku indukčnosti od magnetického toku vo vnútri vodiča, ktorá je nezávislá na polomere i vzdialenosti vodičov [3].

1.3.3 Kapacita vedenia

Kapacita vedenia charakterizuje spätný vplyv pôsobenia elektrického poľa v priestore vedenia medzi vodičmi na dané vedenie. Časovo premenné elektrické pole od napätí vo vodiči indukuje prúdy nielen v samotnom vodiči, ale tiež v ostatných vodičoch. Pre prevádzkovú kapacitu dvojvodičového, súmerného, izolovaného vedenia približne platí [3]

$$C_p \cong \frac{2\pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{d}{r}} \quad [nF/km] \quad (1.7.)$$

1.3.4 Konduktancia vedenia

Konduktancia G_k je reálnou zložkou priečnej admitancie, spôsobuje straty činného výkonu (tzn. priečne straty), ktoré závisia málo na zaťažení, ale sú značne závislé na napätí a na okolitom prostredí. Skladá sa zo strát zvodom cez izolátory a strát *korónou*². Konduktancia sa uplatňuje hlavne až od napäťovej hladiny 110kV.

Zvod sú straty spôsobené izolačným odporom použitých izolátorov, tieto však nemajú nekonečný izolačný odpor, takže dochádza prepúšťaniu určitého prúdu. K tomu dochádza kvôli znečisteniu izolácie, ktorému je vystavená v prostredí kde sa nachádza. Izolácia je vystavená pôsobeniu striedavého elektrického poľa a tým vznikajú dielektrické straty, ktoré sa prejavujú ako nedokonalá izolácia.

V prípade prekročenia kritického napätia medzi vodičmi, dôjde k vytvoreniu koróny – začne preskakovať prúd priamo cez atmosféru. Takže pri kritickom napätí intenzita elektrického poľa v okolí vodičov prekročí izolačnú pevnosť vzduchu. Kritické napätie je závislé na vzdialenosti vodičov, ich polomery a na ich hladkosti. Ďalej v dôsledku vplyvu vlastností okolitého vzduchu – jeho hustoty a vlhkosti, je neľahké určiť konduktanciu. Straty sa obvykle určujú z merania naprázdno (straty naprázdno), tieto sa približne rovnajú prevádzkovým stratám v priečnej admitancii (hodnota konduktancie je približne 10^{-8} S/km). Pre bežné výpočty ustáleného chodu vedenia sa konduktancia zanedbáva [3].

² Koróna – je modrofialový tichý výboj vznikajúci na povrchu vodiča a armatúr vedenia, pri prekročení určitého elektrického poľa. Spôsobuje preskakovanie prúdu do priestoru medzi vodičmi vzdušného vedenia, takže ide o rovnaký efekt ako pri nedokonalej izolácii.

1.3.5 Ostatné parametre vedenia

Z predošlých parametrov vedenia sa dá následne určiť

vlnová (charakteristická) impedancia

$$Z_0 = \frac{U}{I} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad [\Omega] \quad (1.8.)$$

konštanta šírenia (činiteľ prenosu)

$$\gamma = \frac{\Delta U}{U \cdot \Delta I} = \sqrt{(R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad [km^{-1}] \quad (1.9.)$$

konštanta útlmu (merný útlm)

$$\alpha = Re(\gamma) = \sqrt{\frac{1}{2}(R G - \omega^2 L C) + \frac{1}{2}\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2) \cdot (G^2 + \omega^2 C^2)}} \quad [km^{-1}] \quad (2.0.)$$

posuv fáze (merný posuv)

$$\beta = Im(\gamma) = \sqrt{\frac{1}{2}(\omega^2 L C - R G) + \frac{1}{2}\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2) \cdot (G^2 + \omega^2 C^2)}} \quad [rad/km] \quad (2.1.)$$

kde ω [rad/s] je uhlová rýchlosť, α [km⁻¹] merný útlm vedenia, β [rad/km] merný posuv, R [Ω/km] rezistencia, L [mH/km] indukčnosť, G [μS/km] konduktancia a C [nF/km] kapacita. [3]

2 Základná konfigurácia systému PLC

2.1 Základné rozdelenie systému PLC

Komunikácia po sieti elektrického vedenia je presne stanovená v európskej norme CENELEC EN 50065, zaisťuje frekvenčné spektrum od 9 do 140 kHz. (*podstatne sa líši od americkej a japonskej normy*) [1].

Tab. 1.: Pásma v PLC

Pásmo	Frekvenčný rozsah [kHz]	Max prenosová amplitúda [V]	Typ užívateľa
A	9 ÷ 95	10	Dodávateľ
B	95 ÷ 125	1,2	Odoberateľ
C	125 ÷ 140	1,2	Odoberateľ

Pásmo A bude používané obslužnými programami napájania a pásma B a C sú stanovené pre súkromné použitie.

Táto norma umožňuje rýchlosť prenosu dát až do niekoľko tisíc bitov za sekundu, tieto sú dostatočné pre niektoré merané funkcie (*manažment zaťaženia pre elektrické siete, vzdialené načítanie údajov z elektromera, atď.*). Avšak pre použitie v moderných telekomunikačných sieťach, PLC systémy musia poskytovať oveľa väčšie prenosové rýchlosti (rádovo jednotky až desiatky Mbps). Iba v tomto prípade sú PLC siete schopné konkurovať ostatným komunikačným technológiám, najmä v oblasti prístupu.

Pre dosiahnutie vyššej prenosovej rýchlosti dát, budú musieť prenosové systémy PLC pracovať v širšom frekvenčnom spektre. Avšak v tomto prípade, nie sú stanovené žiadne štandardy, ktoré by špecifikovali prevádzku systémov PLC mimo definovaného frekvenčného pásma normy CENELEC. V súčasnosti existuje niekoľko organizácií, ktoré sa snažia raziť cestu pre štandardizáciu širokopásmových PLC sietí (napr. PLCforum, HomePlug ale tiež ETSI a CENELEC).

Služby PLC používajú dva možné spôsoby modulácie: v úzkom a v širokom pásme.

2.1.1 Úzkopásmové PLC

Úzkopásmové PLC (NPL) využíva frekvenčný rozsah pásma A v rámci normy CENELEC (*vid'. Tab.1.*). Úzkopásmové PLC sa používajú pre realizáciu služieb súvisiacich s energiou. Poskytuje prenosové rýchlosti až do niekoľko tisíc bps. Čo sa

týka vzdialenosti medzi dvoma PLC modemami, môže byť maximálne do 1 km. V prípade dlhších vzdialeností je nutné použiť techniku opakovania, tj. použitie *opakovačov*. Úzkopásmové PLC aplikuje tieto modulačné schémy, ako prvú úzkopásmovú realizovanú použitím ASK (Amplitude Shift Keying). Avšak ASK nie je tak zdatné voči rušeniam a preto nie je vhodné pre aplikácie v PLC sieťach. Na druhú stranu, vhodnou a odolnejšou schémou je BPSK (Binary Phase Shift Keying). Avšak, fázová detekcia, ktorá je nevyhnutná pre realizáciu BPSK sa zdá byť zložitá a systémy založené na BPSK nie sú bežne používané. Najnovšie úzkopásmové PLC systémy aplikujú FSK (Frequency Shift Keying) a očakáva sa, že bude použité v budúcich komunikačných systémoch.

Ďalej sú tiež používané širokopásmové modulačné schémy. Výhodou ich použitia (viaceré varianty rozprestrenia spektra) je odolnosť voči úzkopásmovému šumu a útlmu, ktorý je v PLC sieťach nežiaduci. Teda ďalšou používanou schémou v úzkopásmových PLC systémoch je OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [4].

Veľmi dôležitá oblasť pre úzkopásmové PLC aplikácie je automatizácia budov a domácností. Takýto automatizovaný systém realizovaný pomocou PLC môže byť aplikovaný pre rôzne úlohy, ktoré sa majú vykonávať v rámci budov. Tak napríklad kontrola rôznych zariadení, ktoré sú pripojené k vnútornej elektroinštalácii (ako také osvetlenie, klimatizácia, vykurovanie atď.) alebo centralizovaná kontrola rôznych systémov v budove (ovládanie dverí, okien) no a v neposlednom rade sú to úlohy týkajúce sa ochrany (vzájomné prepojenie senzorov, detektorov).

Takýto automatický systém nie je používaný len vo veľkých budovách, ale veľmi často je tiež prezentovaný v domácnostiach pre automatizáciu. V tomto prípade hovoríme o takzvaných *inteligentných domoch*. PLC modemy navrhnuté podľa štandardu *Powernet-EIB* (European Installation BUS) môžu byť jednoducho pripojené do akejkoľvek zásuvky alebo zariadenia pripojeného k elektrickej inštalácii. To nám zaručí komunikáciu medzi všetkými časťami vnútornej elektrickej siete. V súčasnej dobe, PLC modemy využitím FSK dosahujú prenosové rýchlosti až 1200 bps [1].

Ako už bolo spomenuté, štandard CENELEC špecifikuje pásmo A, v ktorom sa používajú služby zásobovania energie (tiež označované ako ERS = Energy Related Service, používané hlavne vo vnútorných aplikáciách). Týmto spôsobom možno realizovať vnútornú komunikáciu medzi riadiacim centrom a rôznymi zariadeniami, zabezpečenie funkcií vzdialenej kontroly bez nutnosti budovania konkrétnej telekomunikačnej siete alebo kupovania sieťových prostriedkov v sieti poskytovateľa. Zároveň môže byť PLC použité pri vzdialenom odčítaní stavu elektromera. Ďalej môže byť použité službami dynamického oceňovania (cena závisí napr. od celkovej spotreby energie v ponuke, na dennej dobe atď.).

2.1.2 Širokopásmové PLC

Širokopásmové PLC (BPL) systémy poskytujú podstatne vyššiu prenosovú rýchlosť ako úzkopásmový systém. Ponúkajú realizáciu zložitejších telekomunikačných služieb (viacnásobné hlasové spojenie, vysoká prenosová rýchlosť, prenos video signálu, atď.).

Realizácia širokopásmových komunikačných služieb prostredníctvom rozvodov elektrickej siete ponúka nákladovo efektívne telekomunikačné siete bez nutnosti pokladania nových káblov. Avšak siete elektrickej energie nie sú navrhnuté pre prenos informácií, preto existuje niekoľko limitujúcich faktorov pri použití širokopásmovej technológie. Ďalším veľmi dôležitým aspektom pre použitie tejto technológie elektromagnetická kompatibilita EMC. Pre realizáciu širokopásmového pripojenia PLC je potrebné podstatne širšie frekvenčné spektrum (do 30MHz) ako je stanovené v CENELEC pásmach.

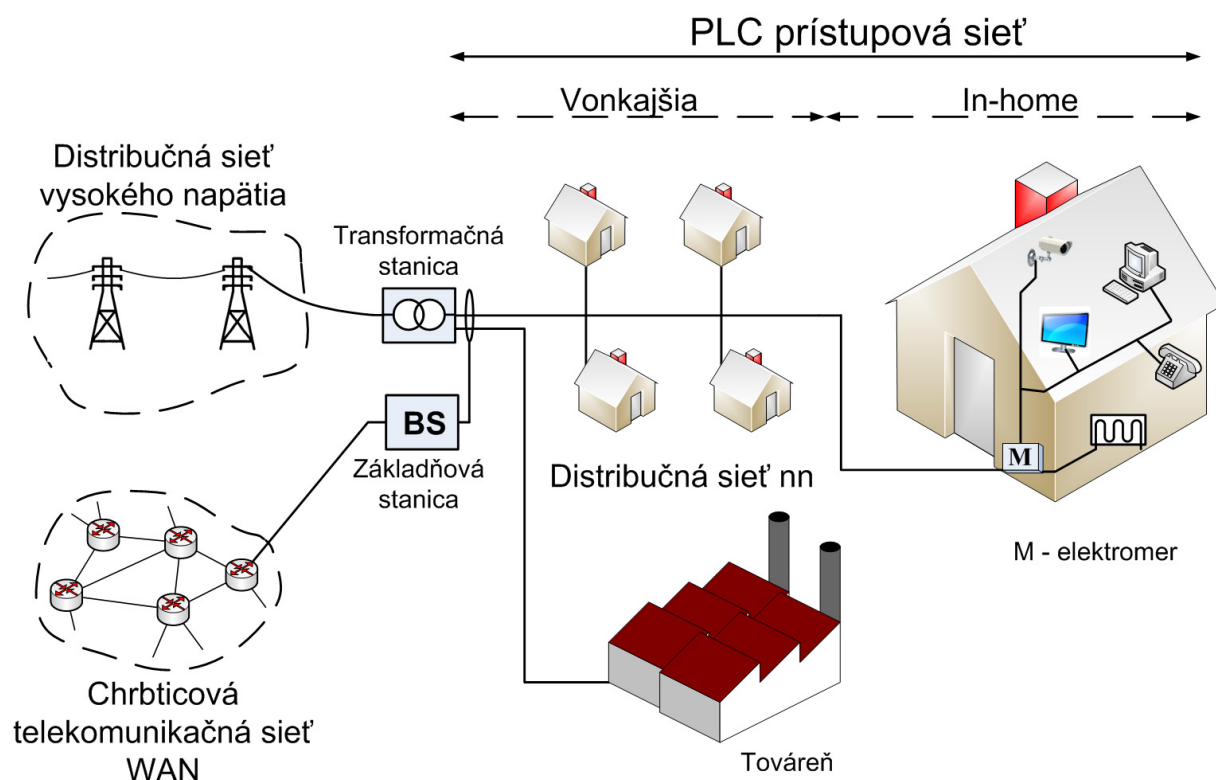
Súčasný BPL systémy poskytujú prenosové rýchlosti nad 2 Mbps vo vonkajšom priestore, ktorý zahŕňa siete stredného a malého napätia a až 12 Mbps v oblasti in-home. Niektorí výrobcovia (napr. DS2, Corinex) už vyvinuli produkty poskytujúce oveľa vyššie prenosové rýchlosti (rádovo desiatky Mbps). Stredné napätie PLC technológie sa zvyčajne používa na vytvorenie point – to – point spojenia premostenie vzdialenosti až niekoľkých sto metrov. Typické oblasti použitia takýchto systémov je spojenie miestnych počítačových sietí LAN siete medzi budovami alebo v rámci areálu a spojenia antén a základňových staníc mobilných komunikačných systémov do ich chrbtícovej siete. Nízkonapäťová PLC technológia sa používa pre realizáciu takzvanej „poslednej míle“ telekomunikačnej prístupovej siete. Teda spojenie medzi zákazníkom a chrbticovou sieťou.

Na rozdiel od úzkopásmových PLC, nie sú uvedené normy, ktoré platia pre širokopásmové PLC systémy [1].

2.2 Prístupová sieť

Pre realizáciu prístupových PLC sietí sa ako prenosové médium používajú rozvody siete nízkeho napätia. Obr. 2. zobrazuje štruktúru PLC siete. PLC prístupové siete pokrývajú posledných pár stoviek metrov sieťovej komunikácie priamo pripájajúce koncových zákazníkov. PLC účastníci sú pripojení do siete prostredníctvom PLC modemov, ktoré zaisťujú prenos dát po nízkonapäťovej sieti.

Na druhej strane PLC sieť je pripojená k chrbticovej sieti (WAN) pomocou základňovej stanice (BS) zvyčajne umiestnenej v transformátore. Veľa služieb dodávajúcich elektrickú energiu majú vlastnú telekomunikačnú sieť spájajúcu transformátorové jednotky a táto môže byť použitá ako chrbticová sieť. Ak tomu však nie je, transformátorové jednotky môžu byť pripojené do konvenčnej telekomunikačnej siete.



Obr. 2.: Štruktúra PLC siete

Účastníci PLC sú pripojení k sieti cez PLC modem umiestnený v elektromery alebo pripojený k akejkoľvek elektrickej zásuvke vo vnútornej elektrickej sieti. Prvý prípad pripojenia je nasledovný, účastníci v rámci budovy sú pripojení k PLC modemu prostredníctvom inej komunikačnej technológie (napr. DSL, WLAN). V druhom prípade je použitá vnútorná elektrická inštalácia ako prenosové médium, tzv. *in-home* PLC riešenie.

PLC modem prevádza prijatý signál z PLC siete do štandardnej formy, ktorý môže byť spracovaný konvenčnými komunikačnými systémami. Teda najčastejšie prevádza Ethernet (10Mbps, 100Mbps) na vysokofrekvenčnú moduláciu superponovanú na sieťové napätie 50Hz a späť [6].

2.2.1 Sieťové prvky

Ako bolo vyššie zmieňované PLC siete používajú rozvody elektrickej siete ako prenosové médium. Na tento účel PLC siete zahŕňajú niekoľko špecifických sieťových prvkov zabezpečujúce konverziu signálu a jeho prenos po sieti.

Ako príklad uvediem zariadenia postavené na bázy DS2 čipsetu s dátovým tokom až 200 Mbps (prenosové rýchlosti download 27 Mbps, upload 18 Mbps), prenosová technika OFDM a pásmo 3 – 34 MHz. Táto PLC sieť sa skladá z nasledovných zariadení:

- a) HE (Head-end) – prepájajú WAN siete s PLC prístupovou sieťou na nízkonapäťových elektrických rozvodoch. Prevádza pripojenú ethernetovú prípojku na elektrickú sieť.
- b) REP (Repeater) – slúži k opakovaniu resp. zosilneniu vŕ signálu. Používa sa frekvenčné alebo časové zdieľanie pásma, prípadne ich kombinácia.
- c) CPE (Customer Premises Equipment) – reprezentuje koncový užívateľský modem, určený pre spätný prevod vŕ modulácie na ethernet rozhranie (RJ45, Fast Ethernet).

Pomocou týchto zariadení je možné vybudovať hierarchickú PLC sieť s koreňovým HE modemom, prípadne medzilahľými REP (niekoľko úrovní) a koncovým CPE modemom u pripojených počítačov. V závislosti od použitého typu HE môže byť rozsah siete až stovky koncových počítačov. Podstatným doplnkom sú väzobné členy (coupling units, CU) pre privedenie vŕ signálu na elektrický rozvod. Tieto členy sa delia podľa fyzikálneho princípu na indukčné (delené feromagnetické jadrá tvoriace vŕ transformátor) a kapacitné (malý väzobný vysokonapäťový vŕ kondenzátor) [6].

3 Poskytované služby

PLC prístupovou sieťou sa často krát myslí doručovateľská telekomunikačná služba, prenášajúca rôzne telekomunikačné služby k účastníkovi. Doručovateľské služby ako je klasická telefónna sieť, X.25 paketová sieť alebo ATM sieť, prenášajúce teleslužby, sú používané v rôznych komunikačných aplikáciách.

Aby bolo schopné konkurovať iným prístupovým technológiám, musí PLC zabezpečiť realizáciu zo širokej palety telekomunikačných služieb s dostatočným QoS. Preto PLC prístupová sieť musí poskytovať rôzne kategórie doručovateľských služieb, ktoré umožňujú prenos rôznymi prevádzkovými tokmi, spôsobené rôznymi telekomunikačnými službami.

Integráciou služieb úzkopásmových do širokopásmových PLC sietí by zlepšilo počiatočné postavenie PLC systémov na trhu v porovnaní s ostatnými komunikačnými technológiami [1].

3.1.1 Telefónia

Počas okamihu rozprávania hlasového spojenia sú rečové informácie prenášané v špeciálnych dátových paketoch. Použitie tichej periódy v hlasovej paketovej prevádzke zlepšuje účinnosť siete, v porovnaní s klasickou telefónnou službou. Avšak, v prípade hlasových paketov nepretržitý tok informácií uvedených v klasickej telefónii neexistuje a hlasové pakety sa môžu oneskoriť a to najmä v prípade, že sa zvyšuje počet účastníkov používajúcich rovnaké prenosové médium.

Prístupové siete ako je PLC, pokrývajú len časť spoločnej prenosovej cesty medzi účastníkmi hlasového spojenia. Preto sú limity na oneskorenie pre telefónne služby v oblasti prístupu oveľa striktnejšie ako pre celú prenosovú cestu.

V súčasných telekomunikačných sieťach sú rôzne druhy služieb prenášané spoločnou prenosovou linkou, s použitím rovnakých prvkov siete ako sú smerovače, prepínače atď.. Telekomunikačné siete po celom svete sú založené na IP protokole, ktorý nebol pôvodne určený pre prenos hlasu. Vzhľadom k trendom v oblasti integrácie hlasových a dátových služieb do IP siete, je riešenie realizované pomocou VoIP (Voice over IP). PLC technológia VoIP na báze protokolu SIP/H.323 otvára možnosti pre využitie ako telekomunikačný hlasový operátor. Očakáva sa, že VoIP postupne nahradí tradičné komutované telefónne siete, keďže už dnes je VoIP zákaznícky akceptovanou alternatívou v EU a USA.

Nedávne skúsenosti s VoIP službami dokazujú, že požiadavky na QoS hlasových služieb (čo najmenšie oneskorenie, minimálny jitter a nízka stratovosť) môžu byť tiež dodržiavané aj v rámci nízko zaťažiteľných sieťach. Obyčajný prenos dát nevyžaduje žiadne špeciálne parametre a preto je mu väčšinou vyhradené

zostávajúce pásmo bez akejkoľvek garancie (*best-effort*). Pri vysokých záťažach výkon VoIP výrazne klesá. Preto je požadované aplikovať rôzne mechanizmy na riadenie dopravy, pre zabezpečenie QoS v prípade časovo náročných služieb.

3.1.2 Širokopásmový internetový prístup

Najčastejšie používanou telekomunikačnou službou v súčasných PLC prístupových sieťach je prenos dát na základe širokopásmového prístupu k internetu, s možnými rýchlosťami až do 200 Mbps. Preto je potrebné analyzovať prenos internetových dát a načrtnúť hlavné charakteristiky týchto dopravných modelov, ktoré sú typické prístupové siete (širokopásmové PLC).

Charakterizácia prevádzky sa vykonáva pomocou série meraní v rôznych sieťach, na dosiahnutie všeobecnejších výsledkov a umožní navrhnutie vhodných modelov, reprezentujúcich takmer reálne prevádzkové vlastnosti. Najviac dopravných modelov predstavujúcich správanie užívateľov internetu sú vytvorené podľa vzoru www prevádzky. Avšak v priebehu posledných rokov sa prevádzkové vlastnosti často menili, v dôsledku rýchleho rozvoja nových telekomunikačných služieb (intenzívny rast drôtových a bezdrôtových sietí, zvýšenie počtu predplatiteľov a operátorov, atď.) [1].

3.1.3 In-home služby

Automatizácia služieb je v dnešnej dobe sa stáva čoraz viac populárnou a to nielen pre použitie v priemyselnom a podnikateľskom odvetví a vo veľkých budovách, ale aj pre použitie v domácnostiach.

Ide o domáci sieťový systém, ktorý umožňuje vybudovať funkčnú domácu sieť využívajúc existujúcu infraštruktúru elektrického rozvodu. Pomocou tejto technológie možno vybudovať okrem domácej PC siete aj plnú automatizáciu služieb, ako je napríklad riadenie osvetlenia, klimatizácie, kúrenia, spotreby energie, automatických exteriérových roliet, manažment zabezpečovacieho systému, atď. Tieto musia mať pripojené množstvo koncových zariadení, ako sú kamery, snímače, svietidlá, elektromotory, atď. Preto sa *in-home* PLC vidí ako rozumné riešenie a to najmä u starších budov a domov, ktoré nemajú príslušnú vnútornú infraštruktúru.

Štruktúra *in-home* PLC sa v podstate moc nelíši od PLC prístupového systému. Základňové stanice môžu byť ukladané spolu s elektromerom alebo na iné vhodné miesto v *in-home* PLC sieti. Všetky zariadenia v tejto sieti sú prepojené prostredníctvom PLC modemov, ako účastníci prístupu k PLC sieti. Modemy sú pripojené priamo do zásuvky v stene, ktoré sú dostupné v celom byte. Tak môžu byť rôzne komunikačné zariadenia pripojené na *in-home* sieť kdekoľvek sú k dispozícii zásuvky.

3.1.4 Pokročilé širokopásmové služby

Ďalšou požiadavkou na širokopásmové PLC prístupové siete a jej rozvoj je ponúkať vyspelé širokopásmové služby. Preto popri základných služieb telefonovanie a prístup na internet, popísané vyššie, musia realizovať služby prostredníctvom vyšších prenosových rýchlostí a vyššími požiadavkami na QoS, ako sú napr. audiovizuálne a multimediálne služby.

3.1.5 Aplikácie pre energetiku

Energetické distribučné siete môžu pomocou PLC technológií zvýšiť prevádzkovú efektívnosť, využívanie infraštruktúry a dokonca aj získať prospech zo služieb z rôznych oddelení. Do týchto aplikácií môžeme zahrnúť AMR (automatic meter reading), správu zariadení, analýzu výpadkov, analýza preťaženia transformátora, monitorovanie straty fázy, charakteristiky zlyhania siete atď. Používajú výrazne nižšie prenosové rýchlosti a zvyčajne nevyžadujú vysokú záruku QoS. Na druhú stranu môžu niektoré služby vyžadovať veľmi nízku dobu odozvy napr. v prípade zabezpečenia

4 Rušenie v silnoprúdovom vedení

Rušenie je jedným z najvýraznejších problémov dátových prenosov po elektrickej sieti. Použitie tohto prenosového média na komunikáciu predstavuje pri vyšších frekvenciách značné technické problémy. Energetické siete väčšinou obsahujú rôzne druhy vodičov zakončených záťažami s časovo sa meniacou impedanciou. Takáto sieť má nerovnomernú fázovú a frekvenčnú charakteristiku. Signál prichádzajúci do prijímača môže na niektorých frekvenciách prichádzať s malými stratami, avšak na iných frekvenciách môže byť potlačený šumom.

Charakteristiky prenosového kanála sa môžu meniť v závislosti na čase, pretože sa menia impedančné pomery v sieti v závislosti na zmene pripojenej záťaže. Rušeniu je možné predísť použitím vyšších kmitočtov pre prenos signálu, ale na druhej sa zvyšuje útlm [1].

Rušenie sa skladá z nasledujúcich šumov:

Šum na pozadí

Tento šum je v sieti prítomný vždy a vzniká skladaním veľkého počtu zdrojov rušenia s nízkou intenzitou. Parametre sa menia v čase. Jeho spektrálna výkonová hustota PSD (*Power Spectral Density*) s rastúcim kmitočtom klesá. Hodnoty PSD sú vysoké v rozsahu rádovo od desiatok Hz až 20 kHz. Na 150 kHz je úroveň PSD rádovo tisíckrát nižšia ako na frekvencii 20 kHz. Na vyšších frekvenciách sa objavujú nízke hodnoty PSD (tzv. *biely šum*).

Úzkopásmový šum

Priebeh úzkopásmového šumu má tvar úzkych špičiek s vysokou PSD. Na frekvenciách do 150 kHz ho spôsobujú hlavne meniče frekvencie, spínané procesy, žiarivky, monitory atď.. Na vyšších frekvenciách toto rušenie pochádza od pozemných rádiových vysielateľov, vysielajúcich na strednom a krátkom vlnovom pásme.

Impulzné rušenie

Spôsobujú ho napríklad spínané zdroje, kolektorové elektromotory alebo tyristorové regulátory. Často je charakteristické krátkymi napäťovými špičkami s dĺžkou trvania jednotky až stovky μs , niekedy až do jednotiek ms . Bežne dosahujú úroveň PSD rovnej o 10 dB, niekedy až o 50 dB viac, než šum na pozadí. Impulzné rušenie sa ďalej delí na:

- a) *Synchrónne* – obsahuje impulzy, s krátkou dobou trvania (jednotky ms) a ich PSD sa znižuje s kmitočtom. Tento typ šumu je spôsobený napájacími zdrojmi pracujúcimi synchrónne s kmitočtom
- b) *Asynchrónne* – obsahuje impulzy, ktoré vytvárajú spektrum s nespojitými čiarami, kmitočtovo oddelené vzhľadom na dĺžku impulzov. Tento šum je generovaný prevažne spínanými napájacími zdrojmi.

5 Kódové zabezpečenie

PLC siete musia pracovať so signálom, ktorého výkon musí byť pod určitým limitom definovaným regulačným úradom. Zároveň musí mať signál dostatočný výkon, aby bol možný dátový prenos. To znamená dostatočný odstup výkonu signálu od výkonu šumu. Pokiaľ nebude tento odstup dostatočný, protichybové kódovanie nebude účinné. Najviac chýb v PLC sieťach spôsobuje impulzný šum, ktorého výkon je značne väčší ako šum pozadí. V tomto prípade už odstup nie je dostatočný, aby prekonal poruchy a dochádza k vzniku chýb. Z tohto dôvodu sa pridávajú mechanizmy pre protichybové kódovanie.

Princíp spočíva v tom, že vysielací kóder vloží podľa daných pravidiel do správy okrem užitočných bitov aj kontrolné bity. Dekóder na prijímacej strane má za úlohu overiť korektnosť prijatých kontrolných bitov. V prípade že nevyhovujú a použitý je *detekčný* kód, dokáže chyby iba identifikovať. Z prijímanej správy sa obvykle chybná kódová skupina alebo blok odstráni, čo môže viesť k strate informácie. Preto sa systém dopĺňa o tzv. spätný kanál, v ktorom sa prenáša automaticky žiadosť o opakovanie prenosu ARQ (*Automatic Request Repetition*).

Použitím *korekčných* kódov je možné chyby nielen detekovať, ale ich aj opraviť. Takto opravenú správu pošle dekodeľ nadriadenej vrstve. K zabezpečeniu prenosu nepotrebný spätný kanál, označujú sa termínom *dopredná korekcia chýb*. Protokol sa označuje skratkou FEC (*Forward Error Correction*). Používa sa v kanáloch s vysokou chybovosťou a je teda vhodný v oblasti prenosu dát po silnoprúdových vedeniach.

Výhoda FEC je v tom, že korekcia chýb vzniknutých pri prenose prebieha v prijímači bez nutnosti opakovania prenosu. Pridaním redundantných bitov na vysielacej strane pomôže prijímaču opraviť chyby vzniknuté pri prenose vplyvom skreslenia a šumu. Maximálna teoretická kapacita prenosového kanála závisí na šírke pásma a odstupe signálu od šumu. Kapacita realizovaných systémov je oveľa nižšia ako teoretická hodnota. Preto sa používajú vhodné kódy, ktoré zlepšujú efektivitu využiteľnosti prenosového pásma [4].

Korekčné kódy môžeme rozdeliť na *blokové* a *konvolučné* kódy.

5.1 Blokové kódy

Charakteristické na blokových kódach je, že je správa najskôr rozdelená do k -bitových blokov s konštantnou dĺžkou bitov. Každému bloku je pridaný podľa istých pravidiel určitý počet paritných bitov, reprezentujúcich prídavnú redundanciu. Ak označíme počet výstupných bitov n , potom počet paritných bitov je $n-k$. Dôležitým parametrom je *kódová vzdialenosť* d (Code Distance) udávajúca počet bitov, v ktorých sa líšia dve používané kódové skupiny. V prípade binárnych kódov sa označujú ako Hammingova vzdialenosť d_{min} . Počet chýb t , ktoré môžu byť

v kódovej skupine opravené sa určuje vzťahom $t = \frac{(d_{min}-1)}{2}$. Váha kódu je určená počtom nenulových prvkov v kódovej skupine, čo pri binárnych kódach odpovedá počtu jednotiek v kódovej skupine. V nasledujúcom texte budú popísané kódy používané vo vytvorenom prenosovom modeli.

5.1.1 Hammingové kódy

Hammingové kódy sú binárne (n,k) kódy, s parametrami $n = 2^m - 1, m \geq 3, m \in \mathbb{N}, k = 2^m - 1 - m$, kde k je počet bitov pôvodnej kódovej skupiny, n je počet bitov skupiny po kódovaní a $n - k = m$ je počet paritných bitov. Kód je schopný opraviť chyby váhy 1.

Kódovanie správ pomocou Hammingovho $(15,11)$ kódu prebieha tak, že sa správa rozdelí na bloky dĺžky 11 a tie sa doplnia 4 kontrolnými symbolmi na kódové slovo. Pri dekódovaní za predpokladu, že vznikla chyba váhy 1 potom pozíciu kde chyba vznikla predstavuje syndróm chyby. Hammingov kód nie je schopný opravovať chyby váhy ≥ 2 . Pri dekódovaní sa takéto chyby buď vôbec neodhalia alebo sa interpretujú ako chyby váhy 1 [8].

5.1.2 Reed-Solomonove kódy

RS kódy sa dajú výhodne použiť na ochranu informácie prenášanej kanálom, v ktorom dochádza k zhukom chýb (*burst errors*). Tieto kódy sa označujú charakteristickou skratkou $RS(n,k)$, kde n je počet bytov výstupného slova, k je počet bytov vstupného zdrojového slova a $n - k = m$ je počet kontrolných bytov. RS dekóder je schopný opraviť maximálne t chybných symbolov a zároveň platí, že $t = \frac{(n-k)}{2} = \frac{m}{2}$. Konštrukčná vzdialenosť RS-kódu je $d_{min}=2t+1$ a váha kódu neprevyšuje hodnotu d_{min} . RS kóder teda na vysielačnej strane pridá k bloku užitočných dát redundantné bity, pomocou ktorých dekóder na prijímačnej strane opraví vzniknuté chyby a tým získa pôvodné dáta [8].

Počet opraviteľných chýb v jednom bloku závisí na parametroch RS kódu. Tieto kódy nie sú efektívne pre opravu nezávislých, ojedinelých chýb [4].

5.2 Konvolučné kódy

Konvolučné kódery sú vybavené pamäťou a kódovanie určitého úseku správy nie je určené iba týmto úsekom, ale tiež predchádzajúcim priebehom správy. Pridaná redundancia sa vkladá tým, že sa nad pôvodným a oneskoreným bitovým tokom vykonáva podľa známych pravidiel isté matematické operácie. Dôsledkom je zvýšenie prenosovej rýchlosti signálu a to aj napriek tomu, že neboli pridané žiadne

kontrolné bity. Konvolučné kódy je preto možné považovať za konvolúciu impulznej odozvy kódera a vstupného signálu, čo taktiež vyplýva i z názvu [4].

Kóder predstavuje posuvný register dĺžky S a niekoľko súčtových členov realizujúcich sčítanie modulo 2, kde S je stupeň generujúceho mnohočlena. Konvolučné kóдеры sa označujú symbolom $K(n,k)$, kde n je rámec výstupných bitov a k je rámec vstupných bitov, pričom platí $k < n$. Vstupný signál je rozdelený do k ciest a privádzaný do posuvného registra. Po vykonaní matematických operácií sú signály na n výstupoch zostavené opäť do jedného bitového toku. Pomer rámca vstupných bitov k a výstupných bitov n udáva *kódový pomer* R (kódovacia rýchlosť), ktorý má zvyčajne hodnoty $\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, \frac{3}{4}, \frac{5}{6}$ alebo $\frac{7}{8}$. V praxi sa používa postup nazývaný *puncturing* (v preklade dierovanie) a predstavuje periodické vymazávanie niektorých symbolov zo správy zakódovanej kóderom s nižšou rýchlosťou. Výsledná rýchlosť sa tým zväčší a je dekóder je menej zložitý [7].

Ďalej platí, že ak je prenosová rýchlosť signálu R_p , potom po konvolučnom kódovaní sa zvýši na hodnotu $\frac{R_p}{R}$. Dôležitým parametrom u konvolučných kódov je dĺžka pôsobenia kódu daná vzťahom $D=(S+1) \times k$, kde k je rámec vstupných bitov a S je dĺžka registru.

5.3 Prekladanie

Prekladanie (z Angl. *Interleaving*) sa používa ako ochrana signálu proti skupinovým chybám (tzv. zhlukom chýb) a tvorí doplnok kanálového kódovania. Princíp fungovania je nasledovný. Bitový tok vstupného signálu je vo vysielacej časti ukladáný do pamäti po riadkoch a čítaný z pamäti po stĺpcoch. Signál na výstupe pamäti má v porovnaní so vstupným signálom zmenené poradie bitov. Tento výstupný tok je prenášaný kanálom. Na prijímacej strane je signál uložený do rovnakej pamäte ako je na vysielacej strane, avšak je signál do pamäti ukladáný po stĺpcoch a čítaný je po riadkoch. Vykonávané operácie ukladania a čítania nemajú žiadny vplyv na užitočný signál. Poradie bitov sa nezmení a je zhodné s poradím bitov vstupného signálu.

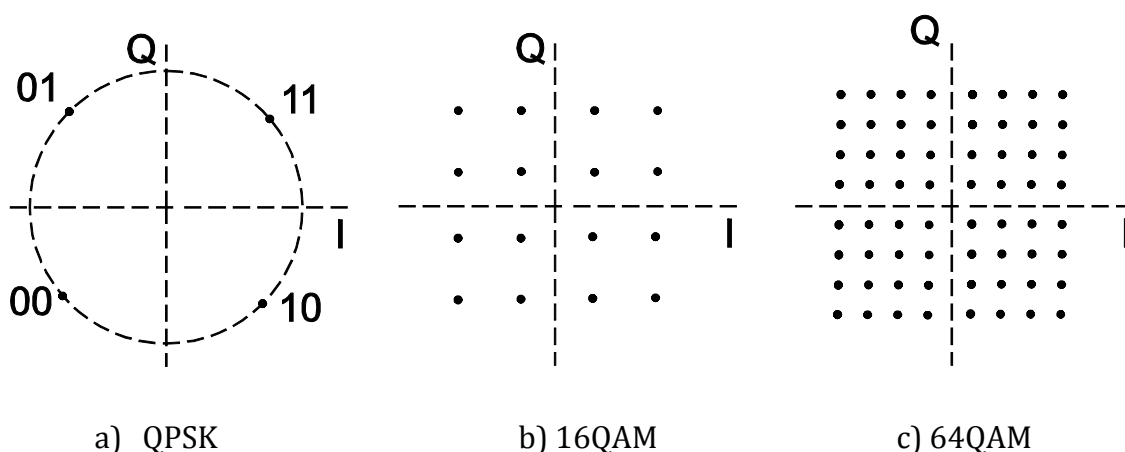
Signál prechodom kanálom môže obsahovať vplyvom rušenia skupinovú chybu, ktorá sa však v dôsledku ukladania a čítania signálu z pamäti na prijímacej strane *rozprestrie* a vytvorí sa len ojedinelé chyby. Počet chybných bitov je rovnaký. Ďalej je na signál s ojedinelými chybami aplikovaný vhodný korekčný kód [4].

6 Modulácie používané v PLC systémoch

Modulácia je proces, pri ktorom dochádza k ovplyvňovaniu niektorého parametru nosného signálu v závislosti na okamžitej hodnote modulačného signálu. Modulačný signál je signál v základnom pásme. Môže to byť napríklad analógový alebo číslicový signál. V prípade, že je modulačným signál číslicový, používa sa často pre označenie modulácie slovo kľúčovanie (z Angl. *keying*).

Modulácia, ktorá má byť použitá PLC systém musí ponúkať vysokú flexibilitu pri používaní. Musí byť schopná vyhnúť sa nejakej danej frekvencii v prípade silného rušenia. Z hľadiska jednoduchšej realizácie sú najvýhodnejšie úzkopásmové modulácie s jednou nosnou, ako napríklad frekvenčné kľúčovanie FSK a fázové kľúčovanie PSK. V prípade viacstavových digitálnych moduláciách vyjadruje každý signálový prvok n bitov tj. určitú kombináciu 1 a 0. Medzi počtom stavov M nosnej a počtom bitov n kódovej skupiny platí $M=2^n$, kde n je prirodzené číslo. Pre grafické znázornenie niektorých digitálnych modulácií sa používa rovina IQ (*In-phase* – synfázna zložka, *Quadrature* – kvadrátúrna zložka), do ktorej sa zakresľujú vektory odpovedajúce jednotlivým stavom nosnej. Namiesto celých vektorov sa zakresľujú iba ich koncové body. Výsledné zobrazenie sa nazýva *konštelačný* resp. *stavový diagram*.

QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) – kvadrátúrne fázové kľúčovanie. Táto modulácia sa vytvára z dvojstavového fázového kľúčovania BPSK dvoch nosných vln, ktoré majú rovnaký kmitočet, ale sú posunuté o 90° . Jedna zo štyroch možných kombinácií dvoch bitov tzv. *dibit* (00,01,10,11) sú priradené ku štyrom stavom nosnej.



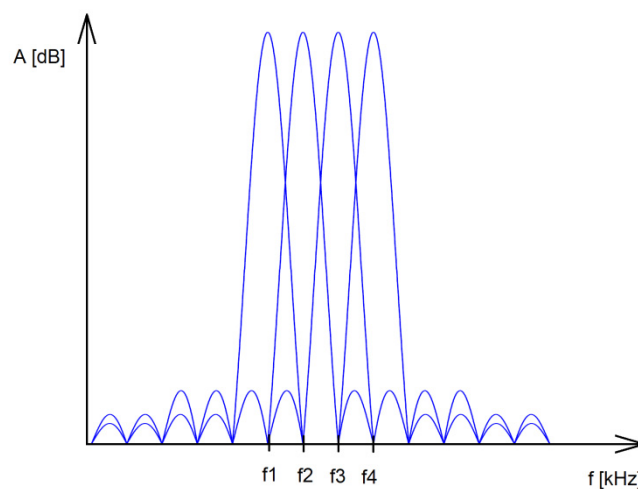
Obr. 3.: Stavové diagramy digitálnych modulácií

Lepšieho využitia konštelačného diagramu je možné dosiahnuť tým, že sa modulačným signálom kľúčuje nielen fáza, ale aj amplitúda nosnej vlny.

QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) – diskretná kvadrátúrna modulácia. Na Obr. 3. sú znázornené stavové diagramy modulácií 16QAM a 64QAM. V prípade napríklad 64QAM vyjadruje každý stav nosnej $M = 64$ nejakú šesťbitovú $n = \log_2 M = 6$ kombináciu 1 a 0. Pri konštantnej symbolovej rýchlosti umožňujú viacstavové modulácie preniesť viac bitov a teda signály s väčšou prenosovou rýchlosťou. Pri konkrétnom porovnaní QPSK a 256QAM je pri konštantnej symbolovej rýchlosti prenesený pomocou modulácie 256QAM signál s prenosovou rýchlosťou 4 krát väčšou než v prípade QPSK modulácie.

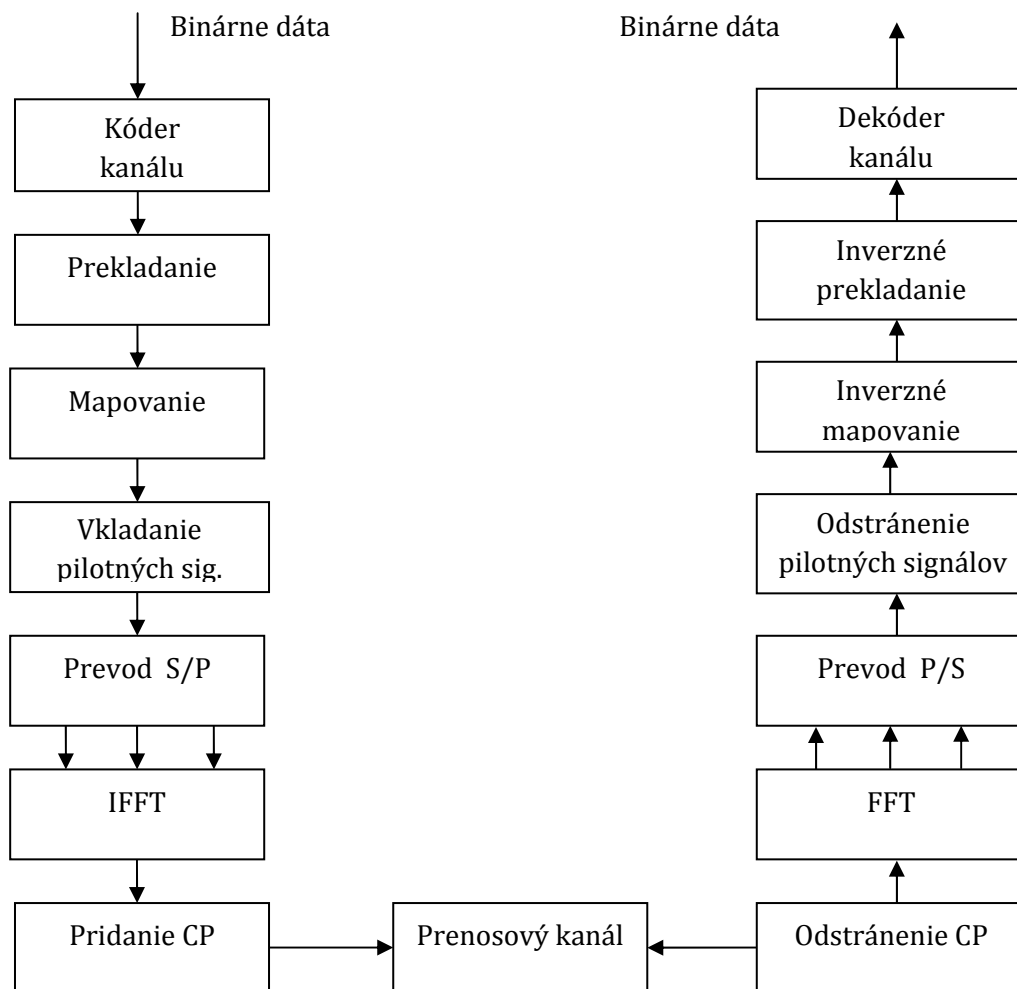
6.1 Ortogonálny frekvenčne delený multiplex OFDM

Princíp OFDM spočíva v tom, že rozsah kmitočtov prenášaných po silnoprúdových rozvodoch sa rozdelí na väčší počet samostatných kmitočtových kanálov. Nosné každého z nich sú ďalej modulované niektorou z bežných modulačných metód. Spektrálna účinnosť techniky OFDM je veľmi vysoká vďaka čiastočnému prekryvaniu sa susedných subkanálov (viz. Obr. 4). Použité subnosné vlny vytvárajú ortogonálnu sústavu a preto sa navzájom neovplyvňujú.



Obr. 4.: Prekrývanie výkonových spektier pre prípad 4 subnosných vln

Schéma systému OFDM je naznačená na Obr. 5. Vysielač v bloku kódovania realizuje zabezpečenie informačného signálu proti chybám pri prenose komunikačným kanálom.



Obr. 5.: Bloková schéma technológie OFDM

Pre zabezpečenie sa používajú kódy označované ako dopredná korekcia chýb FEC, ako ochrana pred nezávislými chybami. Kanálové kódovanie sa doplňuje technikou prekladania, ktorá je použitá k odstráneniu zhlukových chýb. Po kódovaní a bitovom prekladaní sú bity namapované na komplexné modulačné symboly. Sériový tok dát je prevedený na paralelný a pridané sú pilotné signály. V bloku IFFT je realizovaný prevod symbolu do časovej oblasti tak, aby signál obsahoval N oddeliteľných tónov vďaka ich vzájomnej ortogonalite.

Odhad kanála je dôležitý k identifikácii amplitúdy a fázy mapujúcej konšteláciu každej nosnej tak, že komplexný dátový symbol je dekódovaný späť správne. Kanálový odhad v OFDM systémoch vyžaduje vloženie známych symbolov do OFDM signálu.

7 Simulácia v programe Matlab Simulink

Táto kapitola je zameraná na návrh modelu telekomunikačnej sústavy prenosového PLC systému. Na vytvorenie modelu (viz. *A Príloha*) som použil jednotlivé bloky, ktoré sú štandardne dostupné v knižnici programu Matlab Simulink.

Výsledný model bol následne podrobený simulácii, so zameraním na vplyv rušenia prenosového kanálu pri prenose údajov a výpočet BER pre nastavované hodnoty odstupe signálu od šumu. Odsimulované priebehy sú zobrazené v grafoch (viz. Obr. 15 až Obr. 17) a hodnoty sú zapísané v tabuľke (viz. Tab. 2).

7.1 Zostavenie prenosového modelu PLC

Táto kapitola je zameraná na postup vytvárania prenosového modelu a vysvetlenie významu jednotlivých blokov zostaveného prenosového reťazca. Vytvorený model využíva techniku OFDM, čo je technika rozprestrenia spektra a jednotlivé nosné sú mapované jednou vybranou moduláciou z možností QPSK, 16QAM, 64QAM alebo 256QAM. V nasledujúcom texte bude podrobne popísaný postup vytvárania prenosového modelu od zdroja signálu cez prenosový kanál až k prijímaču signálu.

K správne fungovaniu modelu je potrebný program *Matlab Simulink* verzie R2009b (resp. vyššia verzia) a inicializačný súbor *commplc_init.m*, ktorý obsahuje potrebné hodnoty zadávané do blokov ako premenné pred spustením simulácie.

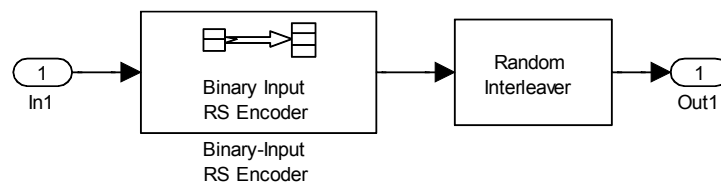
7.1.1 Zdroj dát

Pre simuláciu prenosu dát komunikačným kanálom je použitá pseudonáhodná sekvencia bitov, ktorá je zároveň na výstupe použitá pre porovnanie s demodulovanou sekvenciou a zistenie počtu chybne prenesených bitov. Ako zdroj dát som použil *Bernoulli-ho binárny generátor*, ktorý generuje binárne čísla Bernoulli-ho rozdelenia s nastavenou pravdepodobnosťou 0,5 pre výskyt 1 a 0. Ďalej som zvolil vzorkovací kmitočet 210kHz, takže dobu trvania signálového prvku bude $T_s = 4,8 \mu s$. Výstup je definovaný ako „*Frame-based*“ a veľkosť rámca sa mení v závislosti na vybratom type modulácie a kódovania.

7.1.2 Kóder kanálu

Cieľom kanálového kódovania je zabezpečiť signál proti chybám vznikajúcim pri prenose v komunikačnom kanále. Chyby môžu byť ojedinelé alebo skupinové (*zhluky chýb*). Podstatou zabezpečenia je mierne, úmyselné a kontrolované zvýšenie jeho redundancie, tj. pridanie kontrolných bitov. To sa prejaví malým zvýšením prenosovej rýchlosti a tým i nutnej šírky kmitočtového pásma kanálu, avšak výrazne sa zníži chybovosť signálu BER (*Bite Error Rate*). K tomuto účelu sa používajú zabezpečovacie resp. bezpečnostné kódy, umožňujúce chybu nielen detekovať, ale i opraviť [4].

Pre zabezpečenie prenosu dát ponúka model na výber kódovania typu *Reed-Solomon* alebo *Konvolučné*. Patria do skupiny korekčných kódov, tiež označovaných termínom dopredná korekcia chýb FEC (*Forward Error Correction*), podrobnejšie popísané v teoretickej časti. V prípade R-S kódera (viz. Obr. 6) je potrebné zadať dĺžku kódového slova N a dĺžku správy K . Tieto kódy nie sú efektívne pre opravu ojedinelých chýb.



Obr. 6.: Blok kanálového kódovania s RS kódérom

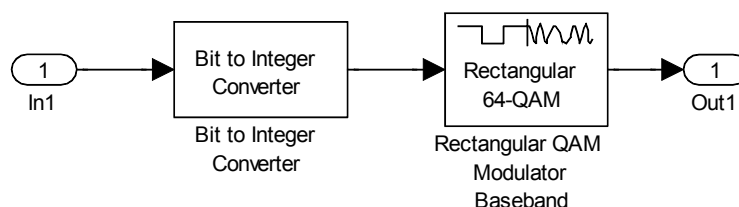
V prípade konvolučných kódov sa zadáva *Trellis* štruktúra *poly2trellis(7, [171 133])*, s obmedzujúcou dĺžkou pôsobenia kódu $K = 7$. Základný blok má hodnotu kódového pomeru $R = \frac{1}{2}$. V prípade pomeru $R = \frac{2}{3}$ som použil dierovací vektor $P = (1\ 0; 1\ 1)$ pre periodické vymazávanie, zapísaný v tvare *reshape([1 0; 1 1], 4, 1)*.

Pre doplnenie kanálového kódovania je za kóderom zaradené prekládanie (*Interleaving*), ako ochrana signálu proti skupinovým chybám. Hodnota v tomto bloku bola nastavená podľa veľkosti rámca vstupujúceho do bloku.

7.1.3 Modulácia

Pred vstupom dát do použitého modulátora je vstupný sériový tok dát prevedený z bitovej postupnosti na postupnosť symbolov, v bloku **Bit to Integer**. Nastavená hodnota v „Number of bits per integer“ závisí od bitovej kombinácie, ktorými je vyjadrený každý stav nosnej pre danú moduláciu. Je to teda počet prenesených bitov behom jedného symbolu.

V bloku (viz. Obr. 7) realizujúcom moduláciu sa nastaví hodnota určujúca počet stavov modulácie. Minimálna vzdialenosť medzi symbolmi je 1. V prípade modulácie QPSK sa zadáva „fázový posun“ $\frac{\pi}{4}$ v radiánoch. Výsledkom mapovania sú symboly rozložené v konštelačnom diagrame.



Obr. 7.: Ukážka realizácie modulácie 64QAM

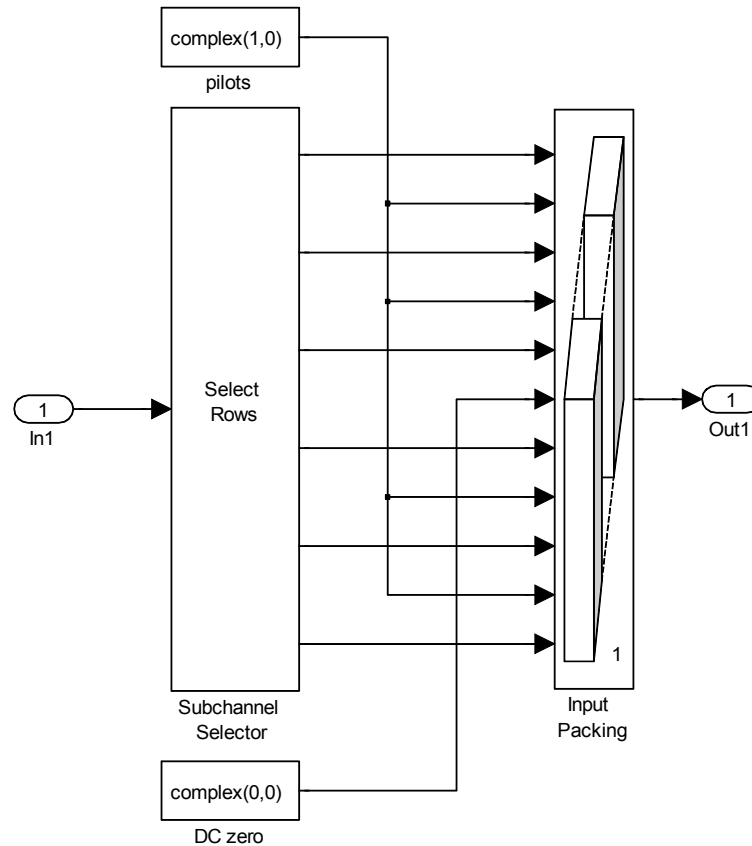
7.1.4 Vkládanie pilotných signálov

Ide o vytvorený subsystém (viz. Obr. 8), v ktorom jednotlivé bloky slúžia na rozdelenie kanálu na subkanály, vloženie pilotných signálov a následné zabalenie do jedného kanálu na výstupe pre ďalšie použitie. Konkrétne sa jedná o blok **Select Rows**, slúžiaci ako sériovo/paralelný prevod. Celkový počet užitočných signálov vystupujúcich z modulátora je 48, tieto sú rozdelené do 6 skupín zadaním nasledovných hodnôt:

{1:6, 7:18, 19:24, 25:30, 31:42, 43:48}

Ďalším blokom je blok **Concatenate**, ktorý funguje ako paralelne/sériový prevod signálu. Na jednotlivé vstupy sú privedené namodulované nosné a na predpísaných pozíciách sú preložené *pilotnými signálmi*.

Do stredu je vložená *nulová hodnota*, odpovedajúca strednej nosnej (to je možné vidieť aj na spektre prenášaného signálu viz. Obr. 14. Celkom teda zadáme 11 vstupov. Toto je dôležité kvôli systémovej detekcie pre realizáciu odhadu prenosového kanálu. Odhad je dôležitý pre určenie amplitúdy a fázy každej subnosnej.



Obr. 8.: Vkladanie pilotných signálov

7.1.5 IFFT a ochranný interval

Nasledujúci subsystém **IFFT/pridanie CP**, prevádza dáta do časovej oblasti a pridáva ochranný interval pre prenos kanálom. Pred vykonaním samotnej transformácie IFFT je potrebné upraviť veľkosť vstupného rámca. Ten musíme doplniť, pri uvažovaní mocnín 2 to znamená doplnenie na veľkosť 64. Na to nám posluží blok **Pad**, v ktorom definujeme výstupnú hodnotu rámca na 64. To znamená, že vstupný rámec doplníme o 11 vzorkou (*nulových*).

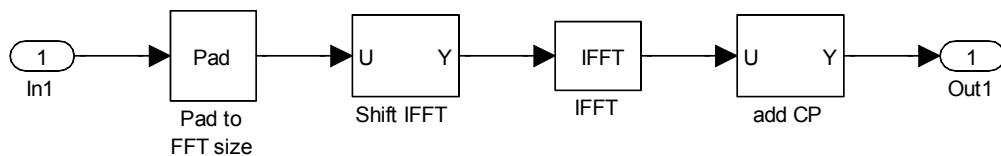
Vzhľadom k cyklickému charakteru IFFT je nutné upraviť usporiadanie nosných, aby nosná so stredným indexom bola v strede frekvenčného pásma výsledného signálu a indexy nosných v spektre odpovedali prirodzenému poradiu [5]. To zabezpečuje blok **Shift IFFT**.

Postup výpočtu indexu s použitím funkcie *ifftshift* v Matlabe, je zobrazený v nasledujúcom kóde. Výsledný index je $[27:64, 1:26]$.

```
%počet FFT point
v.padFFT = 64 ;

%úprava pred IFFT
shiftIFFT = ifftshift(1:53);
v.shiftIFFT = [shiftIFFT(1):v.padFFT, 1:shiftIFFT(1)-1];
```

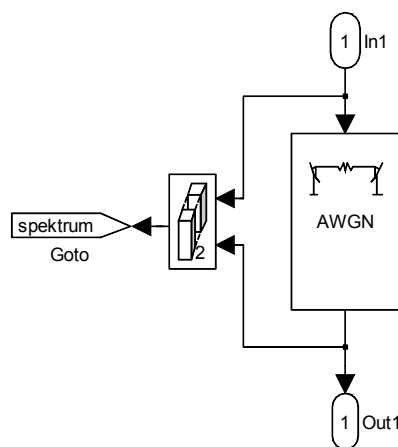
Ďalej nasleduje samotný blok **IFFT** plniaci funkciu inverznej rýchlej Fourierovej transformácii. OFDM používa ochranný interval (*cyklický prefix*), aby sa zabránilo medzisymbolovej interferencii. Nastavíme ho v bloku **Add CP** s indexom $[51:64, 1:64]$ tj. pridanie cyklickej predpony o hodnote 14 vzorkou.



Obr. 9.: Transformácia IFFT a pridanie cyklického prefixu

7.1.6 Prenosový kanál

Pre simuláciu prenosu dát modulovaného signálu zarušeným prostredím som použil blok AWGN (Additive White Gaussian Noise), priamo z knižnice programu Matlab Simulink (viz. Obr. 10). Tento blok pridá kužitočnému signálu biely šum s normálnym rozdelením ekvivalentný zadanej hodnote SNR.



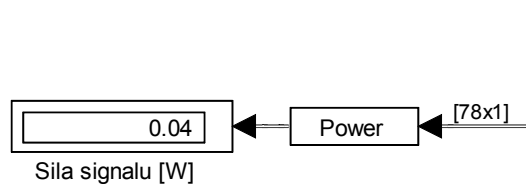
Obr. 10.: Prenosový kanál

Hlavným parametrom je nastavenie odstupu signálu od šumu, ktorý som volil podľa potreby. Najčastejšie používaným pomerom pre zisťovanie chybovosti BER je pomer E_b/N_0 . Hodnota SNR sa vypočíta zo zadaného pomeru E_b/N_0 podľa vzorca [8]

$$SNR = \frac{E_b}{N_0} \times 10 \times \log_{10} \left(\frac{1}{R} \right) + 10 \times \log_{10} (m) \quad [dB] \quad (2.2)$$

kde E_b je stredná energia modulovaného signálu na 1 bit, N_0 je šumová výkonová spektrálna hustota, R je kódová rýchlosť (code Rate) a m je počet bitov na symbol pre danú moduláciu.

Pomocou bloku „Power“ (viz. Obr. 11) je zobrazená sila vysielaného signálu. Táto hodnota je pomocou premennej zadávaná v bloku AWGN do položky *input signal power*.



Obr. 11.: Zobrazenie sily signálu

7.1.7 Prijímač

V tejto časti budú popísané časti modelu na prijímacej strane. Jedná sa o inverzné bloky k strane vysielacej. Po prechode signálu prenosovým kanálom sa na strane prijímača najskôr odstráni CP (cyklický prefix), tj. odoberieme prvých 14 vzorkou - index [15:78].

IFFT je inverznou funkciou FFT, takže nasleduje blok **FFT** a vykoná rýchlu Fourierovú transformáciu. Pre správny tvar upravíme signál z FFT do rámca pomocou bloku **To Frame**, vyberieme hodnotu *Frame-based*. Takže máme rámec veľkosti 64 vzorkou a pomocou bloku **Remove Zero** teraz odstránime celkom 11 nulových vzorkou, ktoré boli pridané a následne umiestnené do stredu rámca na strane vysielateľa. Preto indexujeme [39:64, 1:27].

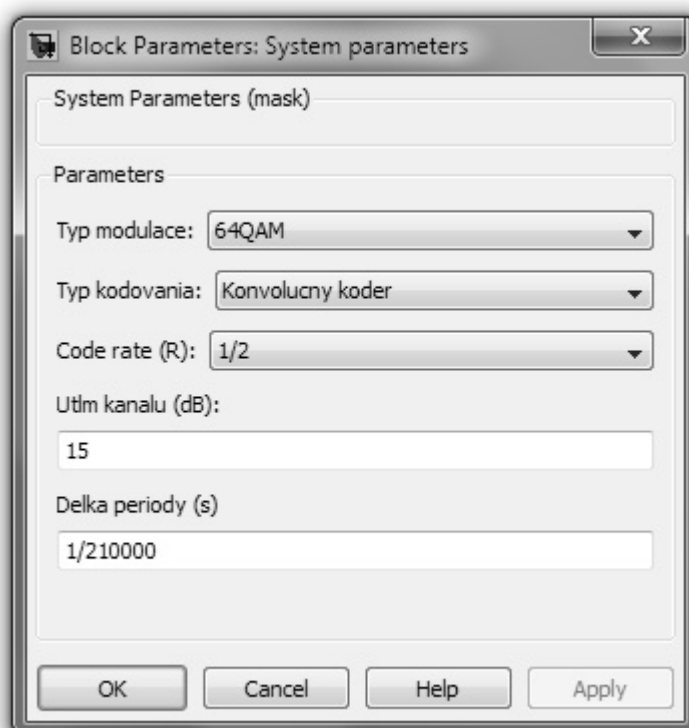
V poradí je ďalší blok **Odobratie pilotných signalov**, v ktorom sa ako názov napovedá odstránia pilotné signály a na výstupe bude len signál užitočný. To dosiahneme pomocou *select rows*, kde určíme pozície na ktoré boli tieto signály vložené.

```
{ [1:6, 8:19, 21:26, 28:33, 35:46, 48:53], [7 20 27 34 47] }
```

Nasleduje subsystém **Demodulacia** a jeho parametre sú inverzné ako v prípade modulácie. Posledným je subsystém **Dekodovanie**, v ktorom najskôr prebehne deinterleaving pre konkrétnu veľkosť rámca a následne dekodovanie prijatých dát s využitím príslušného dekodéra. Pre dekodovanie konvolučných kódov som použil *Viterbiho* dekodér. Pre dodržanie kódového pomeru je potrebné zadať vhodný dierovací vektor (*puncture vector*). Výstupný signál z dekodéra sa ďalej porovnával s vysielaným signálom.

7.2 Popis použitia simulačného modelu

Simulačný model je vytvorený v programe Matlab a v jeho simulačnom toolbox-e Simulink, v ktorom sa aj spúšťa. Konkrétne otvorením súboru nazvaného *commplc.mdl*. Pre správne fungovanie je tiež potrebný inicializačný súbor *commplc_init.m*, ktorého obsahom sú premenné s hodnotami zadávanými do konkrétnych blokov modelu. Z hľadiska použitia simulačného modelu je pre užívateľa zaujímavý blok „Nastavenie parametrov simulácie“, kde sa po jeho otvorení zobrazí dialóg s parametrami modelu (viz. Obr. 12). Užívateľ tu má na výber jednotlivé možnosti nastavenia, zadávané ešte pred začatím samotnej simulácie.

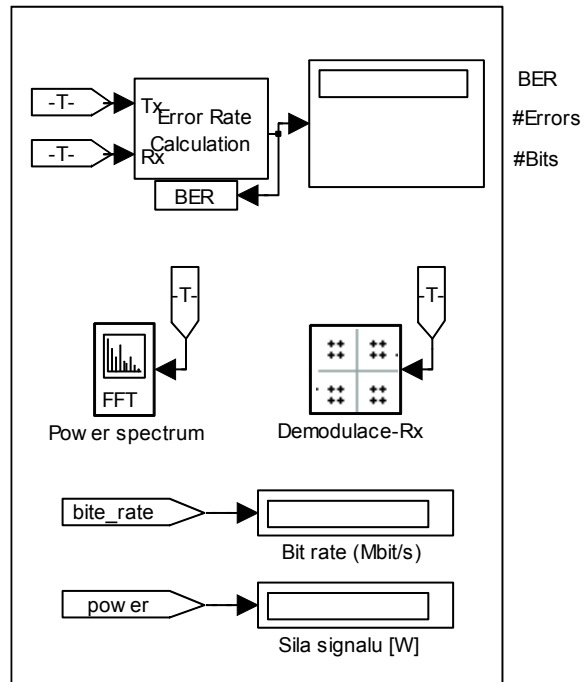


Obr. 12. : Nastavenie vstupných parametrov

Užívateľ si ako prvé môže vybrať z ponúkaných typov modulácií, v možnosti má modulácie QPSK a 16, 64 až 256QAM. Pre vybraný typ kódovania je možné zvoliť kódový pomer. Ďalšou možnosťou je zadanie hodnoty útlmu v jednotkách decibeloch na prenosovom kanále. V prípade potreby si užívateľ môže zvoliť iný vzorkovací kmitočet, zadáním dĺžky periódy $T_s = \frac{1}{f_{vz}}$ [s]. Simulácia sa spúšťa kliknutím na ikonku "play" alebo klávesovou skratkou ctrl+T.

Ďalej sú v modeli použité bloky pre grafické zobrazenie výstupov simulácie (viz. Obr. 13). Po spustení simulácie sa zobrazia celkom dva grafy a to spektrum OFDM signálu pred a po prechode kanálom a konštelačný diagram na prijímacej strane pred vstupom do demodulátora.

Zobrazenie výstupov:



Obr. 13.: Zobrazovanie výstupov simulácie

Model je tiež vybavený blokmi pre meranie bitovej chybovosti BER, užívateľ tak môže priebežne sledovať behom simulácie počet prenesených bitov, počet chybných bitov a pomer chybovosti bitov BER.

Ďalej je možné sledovať aktuálnu prenosovú rýchlosť v Mbps. Zobrazovaná je tiež sila signálu vstupujúceho do prenosového kanálu (tj. do bloku AWGN).

7.3 Výsledky simulácie

V nasledujúcom texte budú popísané a zobrazené výsledky simulácie vytvoreného prenosového modelu. Simulácia je zameraná na vplyv rušenia pôsobiaceho na prenos informácií prenosovým kanálom. Ďalej na výpočet bitovej chybovosti v závislosti na odstupe signálu od šumu. V závere budú zhodnotené dosiahnuté výsledky a vyhodnotenie jednotlivých modulácií a kódovaní.

Vytvorený prenosový model využíva šírku frekvenčného pásma 15MHz a dosahuje v ňom prenosové rýchlosti uvedené v Tab. 2, ktorá tiež obsahuje hlavné parametre pre dosiahnutie výsledných prenosových rýchlostí pri použití rôznych typov modulácií a kódového zabezpečenia.

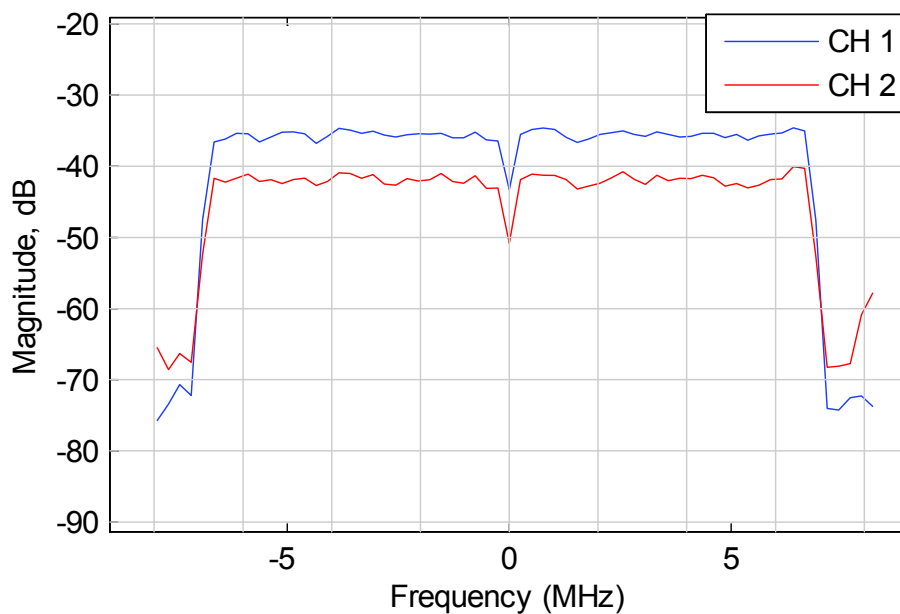
Tab. 2.: Prenosové rýchlosti pre zadané vstupné hodnoty

Prenosová rýchlosť [Mbps]	Modulácia	Kódový pomer	Kódované bity na subnosnú	Kódované bity na OFDM symbol	Dátové bity na OFDM symbol
10	QPSK	1/2	2	96	48
13		2/3	2	96	64
15		3/4	2	96	72
20	16 QAM	1/2	4	192	96
27		2/3	4	192	128
30		3/4	4	192	144
30	64 QAM	1/2	6	288	144
40		2/3	6	288	192
45		3/4	6	288	216
40	256 QAM	1/2	8	384	192
54		2/3	8	384	256
60		3/4	8	384	288

Dosiahnuté prenosové rýchlosti závisia od veľkosti vstupného rámca, teda od počtu bitov obsiahnutých v jednom OFDM symbole. Počet bitov, ktoré má OFDM symbol obsahovať ďalej závisí na zvolenom kódovacom pomere a na type použitej modulácie. Záleží od typu modulácie, aký bude počet prenesených bitov behom jedného symbolu. Prenosový model je teda zostavený tak, aby sme pri zvolenom počte vstupných bitov pre daný kódový pomer a typ modulácie, dosiahli na výstupe každého modulátoru rovnakú hodnotu.

Najväčších prenosových rýchlostí sa dosahuje použitím modulácie 256QAM. S tým však súvisí fakt, že so zvyšujúcim sa počtom stavov použitej modulácie vzrastajú požiadavky na prijímač. Ten musí byť schopný rozlíšiť menšie zmeny amplitúdy, kmitočtu alebo fázy. Navyše v prítomnosti rušenia modulácia nie je tak robustná.

Prenosový kanál, v našom prípade energetické vedenie, je možné využiť iba v určitom rozmedzí frekvencií. Rozdiel hornej a dolnej frekvencie určuje šírku prenosového pásma. Všeobecne platí, že väčšiu prenosovú rýchlosť môžeme dosiahnuť väčšou šírkou pásma, za predpokladu využitia vhodného prenosového kanála, pretože každý kanál má na rôznych frekvenciách iný útlm a je inak zarušený. Nasledujúci Obr. 14 zobrazuje spektrum signálu pred a po prechode kanálom, ktorý na prijímaný signál pôsobil útlmom 6dB (CH1 pred vstupom, CH2 po výstupe z kanála).



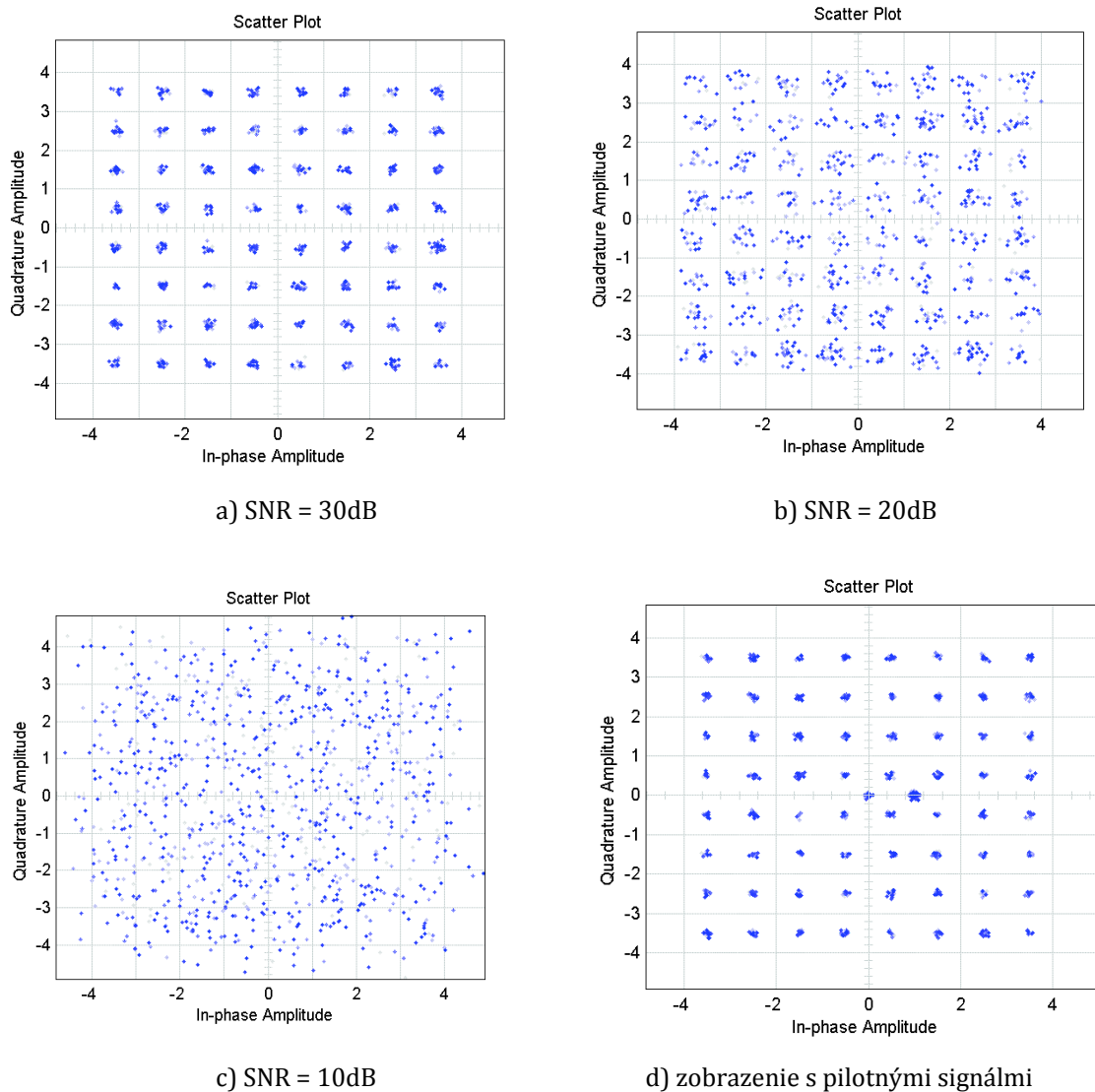
Obr. 14.: Spektrum prenášaného signálu

Zo spektra prenášaného signálu je možné vyčítať, že šírka prenosového pásma je 15MHz. Pre porovnávanie rôznych komunikačných systémov sa zavádza pojem využitie šírky pásma resp. *spektrálna účinnosť* η_s (Spectral Efficiency) a je definovaná ako pomer prenosovej rýchlosti k šírke pásma prenosového kanála.

$$\eta_s = \frac{\text{bitová rýchlosť}}{\text{šírka pásma}} \text{ [bit/s/Hz]} \quad (2.3.)$$

Podľa údajov z tabuľky (Tab. 2) pre najvyššiu dosiahnutú prenosovú rýchlosť je spektrálna účinnosť 4 bit/s/Hz. Na znížení spektrálnej účinnosti sa podieľa aj veľkosť cyklickej predpony (CP).

Konštelačné diagramy, uvedené na nasledujúcom obrázku (viz. Obr. 15), zobrazujú vplyv rušenia na prenos informácií. Pre prehľadnosť som zobrazil diagramy modulácie 64QAM a to pre hodnoty útlmu, v ktorých je rozptýlenie symbolov najvýraznejšie.



Obr. 15. : Konštelačné diagramy modulovaného signálu 64QAM pre rôzne SNR s chybovosťou a) takmer nulovou b) malou (prístupnou) c) veľkou (nevyhovujúcou)

Prvý diagram zobrazuje rozloženie symbolov v rovine IQ (*In-phase, Quadrature*) po prechode kanálom s hodnotou SNR=30dB (Signal/Noise). Rozloženie jednotlivých symbolov sa najviac podobá rozloženiu na vysielačnej strane a teda vplyv rušenia je najmenší. V ďalšom diagrame je hodnota odstupu signálu od šumu zmenšená na 20dB. Rozptyl rozloženia symbolov je už viditeľný avšak ešte prípustný a dá sa hovoriť o hraničnej hodnote. Táto hraničná hodnota, kedy sa chybovosť neprejavuje alebo je príliš malá sa líši v závislosti od typu použitej modulácie. V zostavenom prenosovom modeli bola najodolnejšia proti rušeniu

robustná modulácia typu QPSK, ale ako vidieť z predchádzajúcej tabuľky (Tab. 2) dosahuje najmenších prenosových rýchlostí.

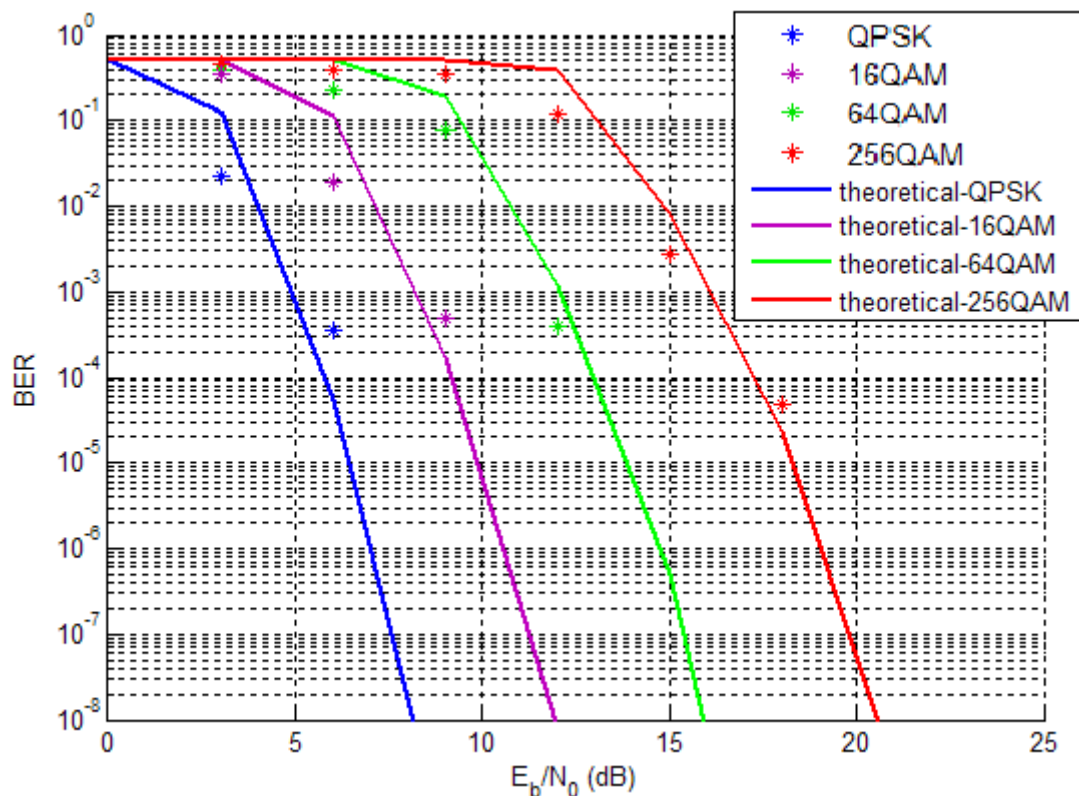
V poslednom diagrame je vidieť príliš veľké rozptýlenie symbolov od pôvodného umiestnenia. V tomto prípade je hodnota šumu vysoká a prenos vykazuje vysokú chybovosť. Pre zaujímavosť je pridaný diagram d) obsahujúci pilotné signály, ktoré sú umiestnené na reálnej osi.

Z výsledkov simulácie je vidieť, že čím sa hodnota odstupe signálu od šumu znižuje, tým výraznejší je rozptyl umiestnenia symbolov od pôvodnej hodnoty a teda chybovosť prenosu sa zvyšuje.

Bitová chybovosť BER je kľúčovým parametrom, ktorý sa používa pri hodnotení systémov, ktoré prenášajú digitálne dáta z jedného miesta na druhé. Definovaná je ako pomer priemerného počtu chybných bitov k celkovému počtu bitov, prenesených za určitý časový interval. Chybovosť je pre danú moduláciu závislá predovšetkým

na pomere signál – šum. Pretože veľkosť SNR je úzko spätá so šírkou spektra prenášaného signálu, používa sa častejšie namiesto SNR pomer E_b/N_0 (Energetic Efficiency) kde E_b je stredná energia modulovaného signálu na 1 bit a N_0 je šumová výkonová spektrálna hustota (výkon šumu na 1Hz).

Nasledujúci graf (Obr. 16) zobrazuje OFDM s moduláciami QPSK, 16QAM, 64QAM a 256QAM ako závislosť bitovej chybovosti na odstupe signálu od šumu E_b/N_0 .

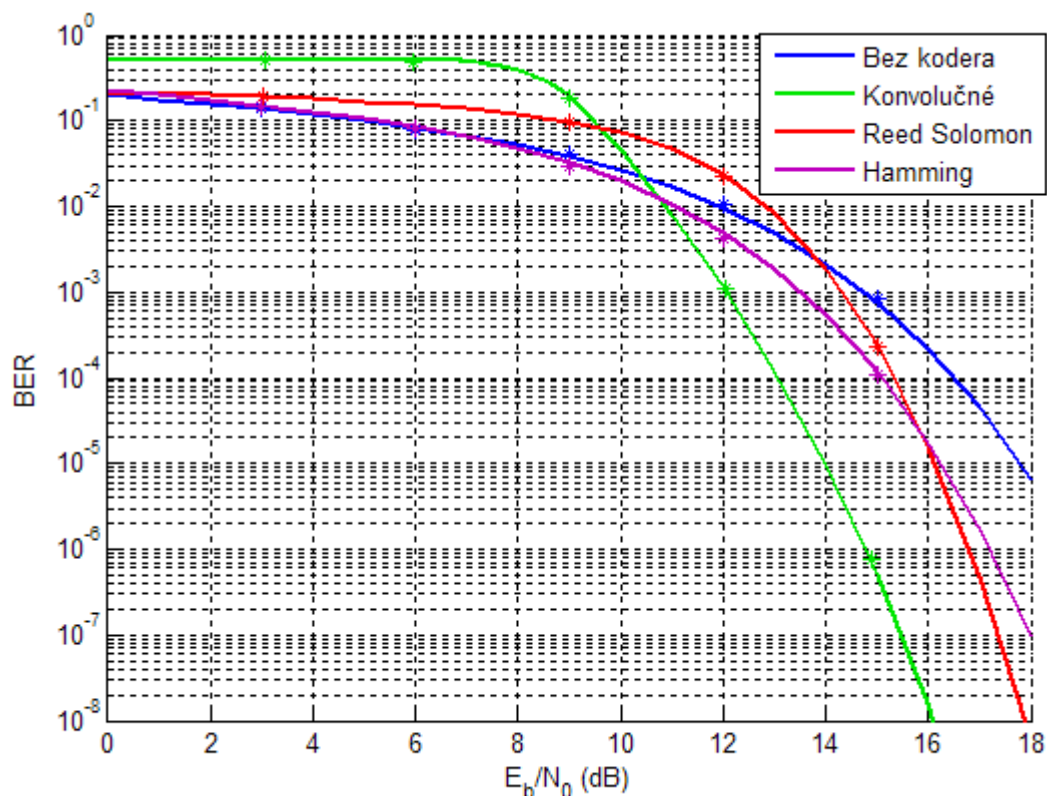


Obr. 16.: Závislosť BER na pomere E_b/N_0 pre rôzne digitálne modulácie

Výsledný graf je výsledkom simulácie získanej pomocou komunikačného toolbox-u BERtool. V ňom je nutné zadať zdrojové dáta, ktoré chceme analyzovať (rozsah pomeru E_b/N_0 , cesta k súboru vytvoreného modelu, zadanie premennej obsahujúcej hodnoty bitovej chybovosti a vhodné limitujúce hodnoty počtu chýb alebo prenesených bitov). Simulácia bola vykonávaná pre 10 000 vzorkou, tj. pre chybovosť 10^{-4} . Výsledné hodnoty zostaveného modelu podrobeného simulácii sú zobrazené bodmi v grafe a k nim je zobrazená im odpovedajúca teoretická hodnota. Z grafu vidieť, že namerané hodnoty sa mierne líšia od teoretických.

Ďalej z grafu vyplýva, že v prípade kedy uvažujeme nejakú požadovanú chybovosť BER (napr. 10^{-4}), potom jej hodnotu s použitím QPSK dosiahneme pri pomere E_b/N_0 približne 6dB. Iné je to v prípade ak použijeme moduláciu s väčším počtom stavov, kedy požadovanú chybovosť dosiahneme pri väčšom pomere signál – šum (napr. pri 256QAM približne 17dB). Ak si naopak zvolíme konštantný pomer signál – šum, potom pri použití modulácie s väčším počtom stavov dosiahneme ďaleko väčšiu chybovosť BER než v prípade modulácie s menším počtom stavov [4].

Na obrázku (viz. Obr. 17) sú zobrazené priebehy závislosti bitovej chybovosti na pomere odstupe signálu od šumu z hľadiska použitia rôznych typov kanálového kódovania pre OFDM s moduláciou 64QAM.



Obr. 17.: Závislosť BER na E_b/N_0 pre rôzne typy kódovania

Z grafu je zrejmé, že z použitých typov kanálového kódovania najlepších korekčných schopností dosahuje konvolučný kóder. Keď uvažujeme hodnotu $E_b/N_0=15\text{dB}$ je zmeraná BER u konvolučného kódovania približne 10^{-6} , v prípade použitých blokových kódov sa chybovosť pohybuje okolo hodnoty 10^{-4} a bez použitia kódera bola hodnota BER približne 10^{-3} . Teoreticky vzaté klasické blokové kódy zabezpečujú správu zvýšením jej nadbytočnosti. Kóдеры blokových kódov nepotrebuju a nemaju pamäť, do ktorej by sa zapisovala kódová správa. Vstupné dáta sú spracovávané paralelne a kódové slovo závisí len od aktuálnych informačných bitov. Hammingov kód je schopný opraviť chyby váhy 1. Pričom váha vektora je počet jeho nenulových zložiek. V prípade váhy ≥ 2 už nie je schopný chybu opraviť. Pri dekódovaní sa takéto chyby buď vôbec neodhalia alebo sa interpretujú ako chyby váhy 1. Opravné schopnosti kódu RS(15,11) s minimálnou vzdialenosťou $d_{\min}=5$, je schopný opraviť chyby váhy ≤ 2 .

Opravné schopnosti u konvolučných kóderov závisia podobne ako u blokových kódov od postupností bitov na výstupe. Kódovanie správy nie je určené len kódovaným úsekom, ale tiež predchádzajúcim priebehom správy [7]. Vo všeobecnosti kódové slová konvolučného kódu sú nekonečne dlhé a teda je schopný opraviť aj viacnásobné chyby, pokiaľ nie sú blízko seba. V prípade konvolučného kódu hovoríme o základnom parametre rýchlosti kódu (Code Rate). Je to číslo rovné podielu počtu bitov k úseku vstupnej správy a počtu bitov n úseku výstupnej správy kóderu. Z tabuľky Tab. 2 je vidieť, že čím väčšia je rýchlosť kódu, tým je prenosová rýchlosť vyššia, ale za cenu nižšej odolnosti voči rušeniu. Dôvodom prečo sa nepoužívajú kódy s rýchlosťami napr. $\frac{7}{8}$ je náročnosť na konštrukciu dekódera. V praxi sa to rieši postupom nazývaným *dierovanie* (z Angl. *puncturing*). Dierovaním sa rozumie periodické vymazávanie niektorých symbolov zo správy zakódovanej kóderom o nižšej rýchlosti. Výsledná rýchlosť kóderu sa tým zväčší a dekóder je menej zložitý [7].

Vývojom turbokódov a ich použitím sa zvýši rýchlosť a efektívnosť komunikácie. Sú vytvárané ako paralelne zret'azené konvolučné kódy. Na jeden konvolučný kóder sa vstupný signál privádza priamo a na druhý cez prekladaný stupeň. Na prijímacej strane prebieha iteratívne dekódovanie.

7.4 Záverečné zhodnotenie

Ako už bolo zmienené v teoretickom rozbere, problematická je časová premenlivosť rušení v silových rozvodoch. Úroveň šumu a útlmu z časti závisí na pripojených záťažiach, ktoré sa menia v čase a z časti na dĺžke vedenia. Takýto komunikačný kanál, meniaci v čase svoje vlastnosti, výrazne komplikuje návrh systému. Možným riešením tohto problému je prispôsobenie komunikačného systému prenosovému kanálu. To teda znamená, že systém musí byť schopný, napríklad pomocou merania alebo algoritmom, kedykoľvek predpovedať charakteristiku komunikačného kanála, ktorú následne vyhodnotí a prispôbí jej svoju komunikáciu. Podľa výsledkov simulácie by sa dalo hovoriť o prispôbení v tom zmysle, že v prípade značného útlmu v kanále, by sa použila robustnejšia modulácia s menším počtom stavov ale menšou prenosovou rýchlosťou. Prenášané dáta adaptovať na vlastnosti kanála a to ako z hľadiska kódovania, tak z hľadiska použitej modulácie.

Z výsledkov simulácie ďalej vyplýva, že pri použití silnejšieho kódového zabezpečenia v kombinácii s robustnou moduláciou, dosiahneme najlepších výsledkov v odolnosti proti rušeniu.

Pre realizáciu prenosového vedenia je možné využitie viacerých možností. V tejto práci je prenosový kanál realizovaný blokom AWGN predstavujúcim aditívny biely šum, s možnosťou nastavenia odstupe signálu od šumu. Iné možnosti realizácie sú založené na popise chovania prenosového kanála ako prenosovej funkcie. Parametre rušenia, okrem šumu, sú realizované ako časovo premenný lineárny filter charakterizovaný frekvenčnou odozvou. Šum je pričítaný ako aditívny interferujúci náhodný proces. Na prijímacej strane použitie ekvalizéra na vykompenzovanie chyby fázy nosných a obnovenie amplitúd, pre korektné umiestnenie bodov v konštelačnom diagrame.

Ďalšou možnosťou je popisovať chovanie kanála z hľadiska prvkov v sieti. Tento typ modelu vedie k rozsiahlejšiemu množstvu parametrov, ktorých hodnoty je zložitejšie vyčíslit' s dostatočnou presnosťou. Vhodnými blokmi v Simulinku by mohli byť bloky zo skupiny "Transmission Lines". Blok z tejto skupiny je možné pripojiť k prenosovému modelu, na miesto prenosového kanála, pomocou vstupného a výstupného portu. Záleží od konkrétneho bloku aké hodnoty budú zadávané, napríklad pokles signálu prechodom kanálom v dB/m, dĺžka prenosového kanála alebo zadaním hodnôt R, L, C a G v jednotkách na 1m dĺžky.

8 Záver

Moja diplomová práca sa zaoberala rozborom PLC (Power Line Communication) systému pre prenos dát po silnoprúdovom vedení a popisom silových vedení z hľadiska základnej konfigurácie. Pomocou dostupnej literatúry tak bola popísaná technológia prenosu dát cez energetickú sieť a bolo zostavené rozčlenenie do odpovedajúcich kategórií s vysvetlením jednotlivých špecifikácií a charakteristík.

Najskôr boli uvedené základné pojmy a rozdelenie silnoprúdových vedení, následne boli popísané elektrické parametre prvkov vedení. V ďalšej kapitole bol rozobraný systém PLC z hľadiska základného rozdelenia na úzkopásmové a širokopásmové, ďalej boli uvedené služby, ktoré PLC systém poskytuje. Popísané tiež boli rušenia ovplyvňujúce prenášaný signál, rôzne typy kódovania a modulačné techniky používané v systéme PLC.

Prínos svojej práce vidím v praktickej časti, kde bol zostavený telekomunikačný model s prenosovým kanálom realizovaného ako biely šum, pomocou simulačného programu Matlab Simulink, vo forme aplikácie pre nastavenie rôznych typov modulácií a kódovaní v súvislosti s odstupom signálu od šumu a bitovou chybovosťou. Užívateľovi je tak po otvorení modelu sprístupnená názornosť realizácie dátovej komunikácie. K vytvoreniu boli použité bloky dostupné priamo v knižnici programu. Najpoužívanějšía prenosová technika u širokopásmovej komunikácie je OFDM, vyznačujúca sa veľkou odolnosťou voči rušeniu. Preto vytvorený model využíva k prenosu dát práve túto techniku.

Zostavený model bol podrobený simulácii a výsledky boli zobrazené v grafoch. Pre zobrazenie výsledkov boli použité bloky pre grafické zobrazenie, konkrétne pre zobrazenie spektra prenášaného signálu a usporiadanie symbolov v konštelačnom diagrame. Taktiež boli použité bloky pre výpočet a zobrazenie bitovej chybovosti. Výsledky simulácie boli vyhodnotené. Z výsledkov vyplýva, že najlepšiu odolnosť voči rušeniu nám zabezpečí modulácia QPSK v kombinácii s konvolučným kódovaním s rýchlosťou kódu $\frac{1}{2}$. Výsledná prenosová rýchlosť však dosahovala najnižšiu hodnotu. Na druhú stranu najväčších rýchlostí dosahovala viac stavová modulácia 256QAM v kombinácii s konvolučným kódom s rýchlosťou kódu $\frac{2}{3}$, avšak s malou odolnosťou voči rušeniu.

V záverečnom zhodnotení bola naznačená možnosť riešenia problému s časovou premenlivosťou rušení v silových rozvodoch. Ďalej boli načrtnuté ďalšie možnosti realizácie modelu PLC prenosového kanála.

9 Použitá literatura

- [1] Hrasnica, H. *Broadband Powerline Communications Networks*. John Wiley & Sons, Chichester 2004. ISBN 0-470-85741-2
- [2] Chee-Mun Ong. *Dynamic simulation of electric machinery using Matlab/Simulink*. Prentice Hall PTR, 1998. ISBN 0-13-723785-5
- [3] Blažek, V., Skala, P.: *Distribuce elektrické energie*. Skriptum VUT v Brně, FEKT.
- [4] HANUS, S. *Radiové a mobilní komunikace: skripta*. Brno: FEKT VUT v Brně.
- [5] ZELINKA, P. Realizace kodéru a dekodéru OFDM pomocí DSP. In *Elektrorevue* [online]. 9.12.2008 Dostupný z WWW:
<<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/0/realizace-koderu-a-dekoderu-ofdm-pomoci-dsp/>>
- [6] ZEMAN, V. *Vyšší techniky datových přenosů: skripta*. Brno: FEKT VUT v Brně.
- [7] ŠEBESTA, V. *Teorie sdělování: skripta*. Brno: FEI VUT v Brně, 2001.
- [8] Olejár, D., Stanek, M.: *Úvod do teórie kódovania*.
- [9] 2007Matlab R2008b. *MATLAB help*.
- [10] *The MathWorks* [online]. 1999. Dostupný z WWW:
<<http://www.mathworks.com>>

Zoznam skratiek

AWGN	(Additive White Gaussian Noise) – prídavný biely šum.
BER	(Bite Error Rate) – bitová chybovosť.
BPL	(Broadband PowerLine) – širokopásmové PLC.
CENELEC	(European Committee for Electrotechnical Standardization) – európska komisia pre elektrotechnickú štandardizáciu.
CP	(Cyklický Prefix) – cyklická predpona.
CPE	(Customer premises) – užívateľské zariadenie
DS2	(Design of Systems on Silicon S. A.) – návrh systémov na silikónovej báze.
FEC	(Forward Error Correction) – dopredné zabezpečenie proti chybám.
FFT	(Fast Fourier Transformation) – Rýchla Fourierova transformácia.
HE	(Head End) – užívateľské zariadenie vykonávajúce injektovanie signálu.
IFFT	(Inverse Fast Fourier Transform) – rýchla inverzná Fourierova transformácia.
PLC	(Power Line Communication) – komunikácia po energetickej sieti.
PSD	(Power Spectral Density) – výkonová spektrálna hustota.
OPERA	(Open PLC Research Alliance) – otvorené zoskupenie pre výskum PLC.
OFDM	(Orthogonal Frequency Division Multiplex) – ortogonálny frekvenčne delený multiplex.
QAM	(Quadrature Amplitude Modulation) – kvadrátúrne amplitúdová modulácia.
QPSK	(Quadrature Phase Shift Keying) – kvadrátúrne fázové kľúčovanie.
REP	(Repeater) – opakovač.
SNR	(Signal to Noise Ratio) – odstup signálu od šumu.

A - Príloha

